

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

«На правах рукопису»
УДК 004.62-5

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ І.Р. Пархомей
(підпис)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: «Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління нестационарним об'єктом»

Виконав: студент другого курсу, групи ІК-72мп
(шифр групи)

_____ Волченко Максим Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доцент Ігнатенко В.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.Р. Пархомей
(підпис)

« ____ » _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Волченко Максиму Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління нестационарним об'єктом»,

науковий керівник дисертації к.т.н., доцент Ігнатенко В.М.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2018 р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження – нестационарний об'єкт другого порядку.

4. Предмет дослідження – проблема і задачі адаптивного управління нестационарними об'єктами.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити – оптимізаційна за витратою палива задача управління нестационарним об'єктом, синтез адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об'єктом, моделювання процесів адаптивного оптимального управління нестационарним об'єктом.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу – п'ять плакатів

7. Орієнтовний перелік публікацій – одна публікація

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз предметної області	14.09.2018 р.	
2	Постановка задачі	17.09.2018 р.	
3	Аналіз існуючих методів управління	21.09.2018 р.	
5	Аналіз доступних методів управління	24.09.2018 р.	
6	Синтез адаптивної системи управління	8.10.2018 р.	
7	Дослідження процесів адаптивного управління	4.11.2018 р.	
8	Маркетинговий аналіз стартап-проекту	13.11.2018 р.	
9	Висновки	20.11.2018 р.	

Студент

(підпис)

Волченко М.І.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Ігнатенко В.М.

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто проблему адаптивності та оптимальності за витратою палива у системах управління нестационарними об'єктами, показано основні особливості існуючих методів моделювання та вирішення задач адаптивності, їх переваги та недоліки.

Проведено дослідження існуючих рішень задач адаптивності управління нестационарними об'єктами та сформовано математичний опис адаптивної оптимальної системи управління нестационарним об'єктом.

Ключові слова: об'єкт, адаптивність, оптимальність, управління.

Розмір пояснювальної записки – 65 аркушів, містить 2 ілюстрації, 18 таблиць, 5 додатків.

ABSTRACT

In the paper the problem of adaptability and optimality of fuel consumption in non-stationary objects control systems is considered, the main features of existing methods of modeling and solving of adaptability problems, their advantages and disadvantages are shown.

The research of existing solutions of tasks of adaptive control of non-stationary objects has been carried out and the mathematical description of the adaptive optimal control system of a non-stationary object has been developed.

Keywords: object, adaptability, optimality, management.

The size of the explanatory note is 65 sheets, contains 2 illustrations, 18 tables, 5 appendices.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1. Оптимізаційна за витратою палива задача управління нестаціонарним об'єктом.....	10
1.1 Типові математичні моделі нестаціонарних рухомих об'єктів.....	12
1.2 Технологічні процеси як нестаціонарні об'єкти управління.....	17
1.3 Постановка задачі оптимального за витратою палива адаптивного управління нестаціонарним об'єктом.....	19

1.4 Умови керованості і невиродженості оптимізаційної за витратою палива задачі для нестационарних систем.....	21
Розділ 2. Синтез адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об'єктом.....	23
2.1 Методи адаптації при управлінні нестационарними об'єктами.....	24
2.2 Метод підслідкуючої моделі та його використання при адаптивному управлінні нестационарними об'єктами.....	26
2.3 Алгоритм прогнозованого оптимального управління одним класом нестационарних об'єктів.....	28
2.4 Функціональна структура адаптивної оптимальної системи управління (АОСУ) нестационарним об'єктом.....	30
Розділ 3. Моделювання процесів адаптивного оптимального управління нестационарним об'єктом.....	35
3.1 Формування математичного опису адаптивної оптимальної системи управління нестационарним об'єктом.....	36
3.2 Результати моделювання адаптивної оптимальної системи управління нестационарним об'єктом.....	44
Розділ 4. Стартап. Розробка адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об'єктом другого порядку.....	50
Висновки.....	69
Список використаної літератури.....	70

Перелік скорочень

САУ - система адаптивного управління;
ОУ - об'єкт управління;
ТЕО - технічно-економічне обґрунтування;
ЛБ - логічний блок;
ПП - прогнозуючий пристрій;

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У теорії та практиці оптимального керування доволі часто виникає потреба синтезу керуючих впливів таких, що забезпечують мінімальну витрату палива та найменший час руху лінійних нестационарних систем автоматичного регулювання. Такі випадки мають місце при керуванні рухом літальних апаратів та технологічними процесами.

Принцип максимуму у випадку лінійності системи керування та невинородженості задачі дає не тільки необхідні умови оптимальності, а ще й достатні. Це дозволяє встановити характер екстремальних керувань.

Загалом синтез керуючої частини замкнених оптимальних систем пов'язаний зі значними технічними складнощами, які викликані як нелінійністю так і не стаціонарністю оптимальної гіперповерхні перемикавання. Введення у систему контурів, що виробляють автоматичне налаштування характеристик керуючої частини оптимальної системи та використання принципу прогнозування дає можливість у ряді випадків реалізувати оптимальні за витратою палива процеси у системах зі змінними параметрами.

Побудова адаптивних систем управління нестационарними об'єктами на сьогоднішній день займає доволі важливе місце в теоретичних дослідженнях при проектуванні складних систем керування. Одна з основних складнощів при розробці адаптивних систем управління полягає в непередбачених змінах характеристик зовнішніх впливів і властивостей керованих об'єктів, а також в не повноті апріорної інформації, як про властивості об'єкта, так і про його зовнішні впливи. Рішенням цих труднощів є надання системам автоматичного керування власне властивостей адаптивності, тобто автоматичного обліку поточної інформації про параметричний і фазовий стани об'єкту. На сьогодні створена теорія детермінованого оптимального керування, що дає можливість за допомогою обчислювальних методів будувати вектор керування заданого об'єкта таким чином, щоб мінімізувати обраний функціонал, що залежить від фазових координат і управління.

Синтезований таким способом з обмеженнями вектор детермінованого оптимального управління являє собою функцію поточних фазових координат об'єкта керування. У різних розділах теорії оптимального управління найближчим до інженерних методів синтезу є аналітичне конструювання систем автоматичного керування. Ефективні прийоми синтезу, які засновані на методах аналітичного конструювання, дозволяють на початковому етапі проектування описати структуру, склад необхідної апаратури і параметри систем управління, що призводить до скорочення термінів проектування та підвищення його якості.

Мета та завдання. Метою даної роботи є розгляд та дослідження методів вирішення проблеми адаптивного оптимального за витратою палива керування нестационарним об'єктом.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі були використані експериментально-теоретичні методи досліджень. Для синтезу адаптивної системи управління були розглянуті різні методи адаптації, а також метод підслідкуючої моделі.

Наукова новизна отриманих результатів. Новизна даної роботи з наукової сторони являє собою власне результати експериментально-теоретичних досліджень використання методів адаптації для синтезу адаптивної оптимальної системи управління нестационарним об'єктом.

Практична значимість отриманих результатів. Результати, що були отримані під час виконання даної роботи мають практичну цінність для використання у реальних умовах при необхідності вирішення задачі оптимального управління нестационарним об'єктом.

Структура роботи. Структуру роботи складають: перелік скорочень, вступ, чотири розділи, висновки та список використаної літератури.

Розділ 1. Оптимізаційна за витратою палива задача управління нестационарним об'єктом

Щоб побудувати адаптивні оптимальні системи управління необхідно виконати низку наступних задач:

- задача про параметричні оцінки, тобто, задача про ідентифікацію динамічних характеристик об'єкту управління з реально діючим на його входи сигналами і реакцій об'єкту на ці сигнали;
- задача оцінок внутрішніх і зовнішніх збурюючих впливів;
- задача обробки та аналізу отриманої інформації від системи ідентифікації;
- задача прийняття рішення, тобто. задача знаходження стратегії оптимального управління шляхом зміни тих або інших характеристик

системи. Таким чином, в результаті дослідження адаптивних систем оптимального управління послідовно вирішуються наступні задачі:

- задача оцінки збурюючих впливів;
- задача оцінки станів в параметричному і фазовому просторі;
- задача обробки та аналізу отриманої інформації про стан та впливи;
- задача створення керуючого впливу.

Кожна із зазначених задач супроводжується вимогами кращої якості протікання процесів, що обумовлює включення їх у загальну теорію адаптивних оптимальних систем управління.

Одним з найбільш важливих питань сучасної теорії автоматичного управління динамічними складними взаємопов'язаними електромеханічними об'єктами є розробка результативних адаптивних алгоритмів управління з безперервною або кусочно-безперервною функцією часу. Це дозволяє послабити вимоги САУ до об'єктів управління. Слід зазначити, що САУ з робастний-адаптивними алгоритмами управління володіють не тільки високою швидкістю, вони ще й дуже прості в реалізації та зберігають свою високу працездатність в умовах заданих параметричних і координатних збурень, змінюються швидко і в достатньо широких межах. Але судячи з даних моделювання, при наявності досить сильно заданих параметричних або координатних збурень перехідні процеси в цих контурах параметричного та сигнального налаштування вже мають малий коливальний характер.

Позбутися подібних коливань «нев'язки» у відповідних контурах налаштування САУ дозволяє використання в алгоритмах управління похідної від вектора функції невязки. Такі адаптивні алгоритми управління можуть синтезуватися на основі схеми швидкісного градієнта за допомогою інтегральних цільових функціоналів. Помилку управління знижує та диференціює регулятор. шляхом застосування адаптивних схем швидкісного градієнта, куди виходять різні алгоритми управління, які забезпечують в електромеханічній системі ті або інші необхідні динамічні властивості. Відомі до сьогоднішнього часу результати теорії робастний-адаптивних систем дозволяють у багатьох випадках синтезувати алгоритми адаптивного управління, що гарантують стійкість і задану якість систем при істотній невизначеності параметрів всіх багатозв'язних об'єктів управління і зовнішніх впливів навколишнього середовища. Однак багато прикладні завдання не піддаються точному аналізу відомими методами. Тому актуальним завданням теорії залишається не тільки

збільшення області застосування методів синтезу робастних-адаптивних САУ, а ще й аналіз динаміки синтезованих систем.

На жаль, отримати строге математичне вирішення зазначених вище двох завдань для конкретного об'єкта не завжди вдається. Постановка конкретного завдання містить досить складний математичний опис багатозв'язних об'єктів з додатковими вимогами і обмеженнями, тому все більше увагу привертають наближені методи аналізу, засновані на зведенні до завдань з відомими рішеннями.

1.1 Типові математичні моделі нестационарних рухомих об'єктів

Об'єкт управління це частина середовища, виділена таким чином, що на нього можна впливати і цей вплив дозволяє перевести стан ОУ в заданому напрямку. Об'єктами управління можуть бути технічні пристрої і агрегати, технологічні установки і процеси, роботи і робототехнічні системи, ділянку, цех і підприємство. У практиці проектування і управління використовуються різні засоби (моделі) для опису ОУ. Під моделлю розуміють залежність, яка в зручній формі відображає суттєві сторони (процеси) реального об'єкта управління (проектування).

Розрізняють моделі для цілей управління, для цілей проектування, для прогнозування, для відображення фізико-хімічних процесів, що протікають в об'єкті, для дослідження, для діагностики, для класифікації, для навчання і т.д.

Модель не обов'язково повинна бути описом фактичного пристрої об'єкта. Модель не повинна бути занадто складною. Її складність повинна знаходитися в певному співвідношенні зі складністю об'єкта управління

(проектування). Вона повинна відтворювати фактичне поведінка об'єкта. Один і той же об'єкт управління (проектування) може бути описаний моделями різного ступеня складності і різного призначення (для управління, для проектування, для дослідження). Моделі бувають концептуальні, фізичні, математичні (аналітичні) в залежності від засобів їх опису. В сучасній теорії управління найбільш часто використовують параметричні моделі в просторі станів. Хоча і класичне уявлення в частотній області особливо для об'єктів зі скалярним входом і виходом вельми інформативно, особливо якщо врахувати можливості систем моделювання, наприклад системи Matlab. Для побудови непараметрических моделей зазвичай застосовують методи, засновані на перетворенні Фур'є або кореляційному аналізі. Параметричні моделі найбільш пристосовані для задач управління. За ним зручно синтезувати алгоритм управління.

Найбільшого поширення набули такі кошти опису: - словесний опис; - креслення і принципові (електричні, монтажні та ін.) Схеми;

- логічні схеми, графи, мережі; - програми на мові програмування;
- криві, номограми, таблиці;
- математичні моделі.

Словесний опис є для розуміння кожного фахівця, але неоднозначно, і не завжди дозволяє провести синтез та необхідний контроль. В задачах проектування, складання та монтажу широко застосовують креслення і принципові схеми, які володіють хорошими описовими властивостями та є однозначними але малоприсади в задачах синтезу управління. Для програмування зручно використовувати логічні блок-схеми, які забезпечують однозначну послідовність процедур управління (проектування), але мають слабку описову здатність.

Криві, номограми, таблиці забезпечують наочне уявлення залежностей між змінними ОУ, наприклад, що управляють, від стану ОУ, вихідних змінних від стану і т.п. Математичні моделі найбільш пристосовані для аналізу стану ОУ і синтезу керуючих впливів для досягнення мети, але мають слабку описової можливість. В залежності від

складності ОУ застосовують комбінацію перерахованих коштів опису. Так словесний опис в основному використовується для опису функціональних (технологічних) моделей ОУ, які описують функції (технологічний процес) об'єкта управління з позиції технологів і проектувальників. Принципові схеми, логічні блок-схеми більше підходять для опису процедурних моделей, що описують порядок дій з управління технічною системою. Математичні моделі, криві, номограми, таблиці найбільше підходять для подання фізичних процесів, що протікають в ОУ, для опису взаємозв'язку змінних і обмежень в задачах проектування. У кібернетиці об'єкт управління, в якому відомі тільки входи і виходи, прийнято називати «чорний ящик». Якщо є апіорна інформація про властивості моделі, наприклад, що вона динамічна або лінійна, то можна говорити вже про «сірий ящик».

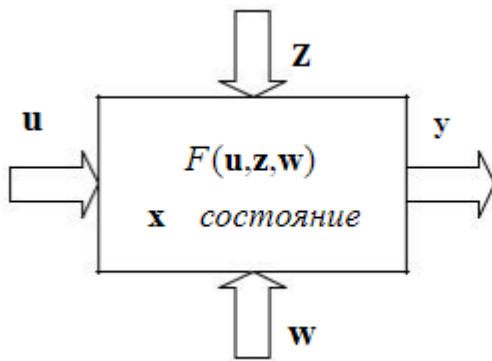
Процес розробки або побудови моделі об'єкта управління (проектування) не можна формалізувати будь-якої процедури, навіть дуже складною. Ефективність процесу розробки моделі, особливо її структури багато в чому визначається кваліфікацією, досвідом, інтуїцією дослідника, можливостями використовуваних програмно-технічних засобів. У більшості випадків для розробки моделі використовують основні фізичні закони (Ньютона, Максвелла, Кірхгоффа, закони збереження маси, енергії, перерозподілу кількості тепла і ентропії). На їх основі розробляють фізико-хімічні моделі (звані також аналітичними або теоретичними). Ці моделі, як правило, представляються у вигляді складних систем рівнянь (алгебраїчних, диференціальних або в приватних похідних).

Інший підхід розробки моделі заснований на застосуванні експериментально-статистичних методів, коли відомості про об'єкт отримують безпосередньо в умовах експлуатації об'єкта (пасивний експеримент), або шляхом навмисних впливів (активно-пасивний експеримент). При цьому структура моделі може бути відносно простий. Відзначимо, що для моделей проектування більш кращі теоретичні моделі. Умовно виділяють наступні етапи побудови моделі експериментально-статистичними методами:

- 1) розробка структури моделі на основі апріорної інформації про фізичні процеси об'єкта управління (проектування) і цілі управління (проектування);
- 2) планування експерименту і збір експериментальних даних;
- 3) оцінювання невідомих параметрів (коефіцієнтів) обраної структури моделі до наявних вхідних і вихідних даних об'єкта управління (проектування);
- 4) перевірка адекватності розробленої моделі реальному об'єкту;
- 5) використання отриманої моделі відповідно до обраної ціллю.

Характеристика моделей об'єктів управління

Незалежно від складності об'єкта управління його структурна схема може бути представлена у вигляді (мал. 1).



Мал. 1. Структурна схема ОУ

Тут \mathbf{u} $\mathbf{u}(t) u_1(t) u_2(t) \dots u_m(t)_T$ – вектор керуючих впливів, t – час, T – знак транспонування;

\mathbf{z} $\mathbf{z}(t) z_1(t) z_2(t) \dots z_r(t)_T$ – вектор контрольованих некерованих впливів (збурень);

\mathbf{w} $\mathbf{w}(t) w_1(t) w_2(t) \dots w_l(t)_T$ – вектор неконтрольованих впливів (перешкод і збурень);

$\mathbf{x} \mathbf{x}(t)x_1(t)x_2(t) \dots x_n(t)_T$ – вектор стану ОУ, що містить всю інформацію про минуле ОУ, що необхідна для визначення реакції на входні впливи;

$\mathbf{y} \mathbf{y}(t)y_1(t)y_2(t) \dots y_p(t)_T$ – вектор спостережуваних вихідних змінних.

Залежність між вихідними і входними змінними в загальному вигляді представляється моделлю:

$$\mathbf{y} = F \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{w}.$$

Якщо F – функція, то модель описує статичні об'єкти. Якщо F – оператор (інтегрування, диференціювання, перетворення Лапласа), то об'єкти динамічні. Таке різноманіття моделей обумовлено, з одного боку, видом входних впливів, з іншого – видом залежності F . Коротко характеризуючи входні впливи.

Керуючі впливи $u_i(t)$, як правило, представляють кусочно безперервну функцію, що задовольняє обмеженням

$$u_i(t) u_{i, \min}(t) \leq u_i(t) \leq u_{i, \max}(t), i, m,$$

де $u_{i, \min}(t)$ – нижнє і $u_{i, \max}(t)$ – верхнє значення i -го управління, допустиме з фізичної можливості бути реалізованим або енергетичними можливостями пристрою управління.

Множину всіх допустимих значень керуючих впливів можна представити у вигляді

$$U = \{u \in E^m, u(t) u_{i, \min}(t) \leq u_i(t) \leq u_{i, \max}(t), i, m,$$

де U – допустима множина керуючих впливів E^m ;

m – мірне евклидов простір.

Вираз читається так: «Безліч U складається з елементів u , що належать m – мірним евклидову простору і задовольняють позиційним обмеженням по всім змінним». Передбачається, що змінні $u_i(t)$ можна змінити миттєво. Якщо реалізація управління виконавчим механізмом описується диференціальним рівнянням, то ці динамічні процеси слід віднести до ОУ і виділити таке $u_i(t)$, яке по відношенню до знову виділеному об'єкту є безінерційним. Тут не розглядаються системи, що стежать, де виконавчі механізми можна вважати інерційними.

1.2 Технологічні процеси як нестаціонарні об'єкти управління

У даній частині мова піде про технологічні процеси, їх визначення та важливість у теорії адаптивного оптимального керування. Технологічний процес – це первинна ланка створення матеріальних цінностей. У технологічних процесах відбувається перетворення або обробка матеріалів, енергії та інформації. У результаті проходження технологічного процесу отримується вихідний продукт, що відрізняється від початкової сировини. Залежно від способу перетворення або перенесення матеріалу, енергії та інформації технологічні процеси поділяють на такі групи:

- 1) безперервні технологічні процеси
- 2) безперервно-дискретні технологічні процеси (перервані потоки, процеси в обмежений час: виплавка сталі, полімеризація, вулканізація);
- 3) дискретні технологічні процеси (одноразове проходження процесу: виготовлення деталей).

При розробці ставиться завдання – отримати економічний ефект від

впровадження системи управління. Розробка технічно-економічного обґрунтування пов'язана із вирішенням різних задач: технологічних, технічних, організаційних. При цьому ТЕО визначається кількісною оцінкою рівня економічної ефективності, тобто економічного критерію управління. За критерій можуть бути вибрані такі показники:

- збільшення обсягу виробництва, викликане поліпшенням використання обладнання та підвищенням випуску річної продукції;
- зменшення витрат сировини, матеріалів, палива, енергії на виробництво одиниці продукції в результаті зниження матеріало- та енергоємності виробництва;
- підвищення продуктивності праці – збільшення кількості продукції в одиницю часу в розрахунку на одного працюючого;
- поліпшення якості продукції, тобто випуск продукції вищого ґатунку за рахунок кращого функціонування систем управління.

Основним інтегральним показником економічної ефективності є річний економічний ефект, який отримується за рахунок зниження собівартості продукції та призводить до приросту прибутку. За своєю природою всі технологічні процеси відрізняються один від одного.

Для подання технологічного процесу як об'єкту управління незалежно від його природи, необхідно абстрагуватися від фізичних, хімічних або технологічних особливостей відповідного об'єкта шляхом переходу до загальних принципів і методів подання об'єктів у теорії управління. Для застосування загальних методів теорії управління технологічний процес

розглядається як багатовимірний об'єкт де – вхідні параметри (параметри сировини і теплоносія: витрата сировини, тиск, температура, хімічний склад, концентрація тощо);

1.3 Постановка задачі оптимального за витратою палива адаптивного управління нестационарним об'єктом

На даному етапі розглядається клас лінійних неавтономних систем, описаних векторними диференціальними рівняннями виду

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + B(t)U, \quad (1)$$

де $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор стану системи;

$A(t) - n * n$ - матриця-функція коефіцієнтів системи
виду

$$A(t) = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & a_{nn-1}(t) & a_{nn}(t) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$b(t) = \{b_1(t), 0, \dots, 0\}$ $n_{\text{мірна}}$ - вектор-функція

U - керуючі впливи, що задовольняють умові:

$$|U| \leq U_{\max} \quad (1.3)$$

Подібними рівняннями описується рух систем, структурно представлених послідовним з'єднанням лінійних динамічних ланок першого порядку з нестационарними параметрами.

Задача управління у даному випадку заключається у пошуку допустимих

керуючих впливів, які задовольняють умові (1.3) і переводять систему на інтервалі часу

$[t_0, t_1]$ до первинного стану $x(t_0) = x^0 = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0\}$ у кінцеве $x(t_1) = x' = \{0, 0, \dots, 0\}$, забезпечуючи при цьому мінімальне значення функціоналу виду

$$F(U, t) = \int_{t_0}^{t_1} (K + |U|) dt, \quad (1.4)$$

враховуючи як витрату палива, так і час, що витрачається на рух.

Тут $K > 0$, а t_1 завчасно не фіксовано.

У відношенні функцій $a_{ij}(t)$ та $b_l(t)$, що входять у (1.1) вважаємо, що вони знакопостійні на інтервалі $(0 < t < \infty)$ мають відповідно неперервну похідну та область визначення

$$\begin{aligned} a_{ij}^{min} &\leq a_{ij}(t) \leq a_{ij}^{max} & i, j = 1, 2 \dots n \\ b_l^{min} &\leq b_l(t) \leq b_l^{max} \end{aligned}, \quad (1.5)$$

причому

$$\begin{aligned} |a_{ij}(t)| &< a_{ij}^{max} \\ |b_l(t)| &< b_l^{max} \end{aligned}$$

1.4 Умови керованості і невиродженості оптимізаційної за витратою палива задачі для нестационарних систем

Принцип максимуму, що дає необхідні умови оптимальності дозволяє у даному випадку визначити екстремальні управління, $U^*(t)$, що абсолютно мінімізують функціонал (1.4) [1.2], як кусочно постійну функцію виду

$$U^*(t) = -dez < b(t)\psi(t) > , \quad (1.7)$$

яка приймає наступні значення

$$\begin{aligned} U^*(t) &= 0 \quad \text{при} \quad |b_l(t)\psi_l(t)| < 1 \\ U^*(t) &= -sign\{b_l(t)\psi_l(t)\} \quad \text{при} \quad |b_l(t)\psi_l(t)| > 1 \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq U \leq 1 \quad \text{при} \quad b_l(t)\psi_l(t) = 1 \\ t \in [T_1, T_2] \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} -1 \leq U \leq 0 \quad \text{при} \quad b_l(t)\psi_l(t) = -1 \\ t \in [T_1, T_2] \end{aligned}$$

де $[T_1 T_2] \subset [t_0 t_1]$

Можна показати, що у силу невиродженості задачі та лінійності системи (1.1) випадок (1.9) має місце лише для кінцевого числа точок $\in [t_0, t_1]$

Функція $H(x, \psi, U, t)$ у розглядаємому випадку визначається виразом

$$\begin{aligned} H(x, \psi, U, t) &= K + |U| + (\psi Ax) + (b\psi) \\ &= K + |U| + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij}(t)\psi_i(t) + b_l(t)\psi_l(t) \end{aligned} \quad (1.10)$$

та для всіх

$$t \in [t_0, t_1] \quad H(x(t), \psi(t), U(t), t) = 0$$

а сполучена система для вектора $\psi(t) = \{\psi_1(t), \dots, \psi_n(t)\}$,

що входить до (1.7) записується у вигляді

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = -A'(t)\psi(t) ,$$

(1.11)

де $A'(t)$ - транспонована матриця $A(t)$

Для подібних систем, але з постійними параметрами при рішенні задачі максимальної швидкодії встановлено структурну властивість оптимальних процесів, що називається послідовною оптимальністю, що складається у співпадінні на певних інтервалах оптимальних керувань для повної та скороченої систем. Під останньою розуміється система, що створюється з вихідної шляхом відкидання останнього рівняння.

Розділ 2. Синтез адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об'єктом

З тенденцією до інтенсифікації процесів виникає потреба оптимального у зазначеному сенсі управління об'єктами. Застосування лінійних законів управління для ряду об'єктів виявилось неефективним через те, що керуючі впливи обмежені, а також через великі швидкості зміни координат об'єкту порівняно із великим запізненням в реакції системи на керуючий вплив. У деяких випадках неправильно або недостатньо точно сформований на початку процесу управління керуючий вплив, що призводить до неможливості у подальшому наявними засобами скорегувати недопустимий з тих чи інших причин розвиток процесу. У цьому випадку виникає задача захисту об'єкту управління від попадання у недопустимий стан як при ручному управлінні, так і при несправності системи автоматичного управління. Дані обставини у низці випадків змушують навмисно уповільнювати процеси управління. Оптимізація процесів класичними методами і, зокрема, побудова оптимальних за швидкістю систем, незважаючи на розвинену теорію, нашою хвється на труднощі апаратної реалізації систем управління (використання в системі управління обчислювальних пристроїв для розв'язання крайових задач за принципом максимуму, для відтворення поверхні або гіперповерхні перемикання, для вирішення трансцендентних рівнянь і т. п.). Але прискорення процесів управління може бути досягнуто й іншим шляхом, а саме, за допомогою методу прогнозування. Характерна особливість цього методу полягає у послідовному визначенні кінцевого результату впливу обраного у даний момент управління.

Сутність методу управління із прогнозуванням полягає у тому, що управляючий вплив формується на ґрунті результатів передбачення майбутньої поведінки об'єкту управління. Залежно від оцінки розбіжності (різності) отриманого термінального прогнозованого стану системи (за умовами відповідно обраного оптимального управління) від заданого кінцевого стану, визначається управління системою у поточний момент часу. Тобто прогнозування вимагає знання математичного опису динаміки об'єкту та його поточного стану, а зіншого боку – розв'язання задачі про кінцевий стан об'єкту за певного управляючого впливу.

2.1 Методи адаптації при управлінні нестационарними об'єктами

Висока швидкість технологічних процесів, наявність великої кількості збурень, що обумовлені взаємодією окремих частин виробничого процесу та зміною зовнішніх умов, залежність режимів роботи устаткування від часу викликає необхідність створення високоякісних систем автоматичного управління.

Ефективність виробничого процесу безпосередньо залежить від роботи систем керування. У деяких випадках нові агрегати в принципі не можуть функціонувати без високоякісних систем автоматичного управління. Алгоритми функціонування систем керування, отримані на стадії проектування по математичній моделі об'єкта, в значній мірі відрізняються від дійсно оптимальних алгоритмів, особливо в частині чисельних значень їхніх параметрів настроювання. Це пояснюється, насамперед, недосконалістю апріорної моделі об'єкта. Широкий діапазон зміни динамічних властивостей, неповнота апріорної інформації про умови роботи системи призводять до того, що спроектовані оптимальні САУ можуть стати непрацездатними або будуть мати низькі показники якості. Відомий ряд термінів, які були запропоновані для визначення систем, що пристосовуються до умов, які змінюються. Серед них такі як «управління з навчанням», «самооптимізація», «самоорганізація». Автоматичні системи, у яких параметри, структура системи або керуючі впливи автоматично змінюються на основі поточної інформації з метою досягнення оптимального в якомусь сенсі стану системи при початковій невизначеності й умовах, що змінюються, називаються адаптивними.

Адаптивна система - така система, що забезпечує в темпі реального процесу зменшення апріорних невизначеностей, що призводить до ефективного управління ходом процесу. У визначенні використовується

поняття «ефективне управління»" замість оптимальне, у зв'язку з тим, що в більшості випадків строга оптимальність недосяжна.

Різниця між класичними регуляторами зі зворотнім зв'язком та адаптивними регуляторами в тому, що класичні використовують принцип зворотного зв'язку для компенсації невідомих збурень та станів об'єкта.

Самонастроювальна система автоматичного управління - це така система, у якій на основі інформації про параметри зовнішніх впливів, про динамічні характеристики об'єкта або системи, одержуваних у процесі роботи, здійснюється зміна параметрів регулятора або керуючий вплив з метою досягнення заданого або екстремального значення критерію якості функціонування.

Динамічні властивості деяких об'єктів повністю визначаються зовнішніми факторами, доступними прямому виміру. Якщо відомо, як повинен настроюватися регулятор залежно від цих факторів, можна застосовувати прямий метод настроювання, або адаптацію по розімкненому циклу. При цьому сигнали зворотного зв'язку, що йдуть від замкнутого контуру управління до регулятора, відсутні.

В умовах, коли неможливо оцінити динамічні властивості об'єкта безпосередньо, доводиться використовувати настроювання зі зворотним зв'язком, або адаптацію по замкнутому циклі.

Функціонально-адаптивними називаються такі АСАУ, у яких виробляється зміна параметрів або управління залежно від значення критерію якості функціонування системи.

2.2 Метод підслідкуючої моделі та його використання при адаптивному управлінні нестационарними об'єктами

Для реалізації оптимальних процесів у лінійних нестационарних системах необхідно щоб параметри керуючої частини синтезуючої оптимальні впливи, відповідали поточним значенням параметрів системи.

Оскільки закон зміни параметрів системи часто невідомий, то при оптимізації керування, слід вирішувати задачу параметричної ідентифікації та налаштування керуючої частини, яку при застосуванні прогнозування є можливим здійснити на основі методу допоміжного оператора.

Уявимо рівняння руху нестационарного об'єкта, де під таким розуміється, власне, об'єкт та незмінна частина регулятора у операторній формі:

$$x_n(t) = W(p, \dot{a}(t))U(t) \quad (2.1)$$

де $p = \frac{d}{dt}; i, j = 1, \dots, n$

$$W(p, \dot{a}_{ij}(t)) = \prod_l^n W(p, a_{ij}) - \text{оператор об'єкта.}$$

Припускаючи, що координати об'єкта доступні для виміру, обираємо у якості критерію якості налаштування, що забезпечує параметричну ідентифікацію об'єкта управління функціонал, що має вигляд

$$I_i = (\varepsilon_i + q_i \varepsilon_i)^2 = \min, \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_i(t) = x_i(t) - x_i^M(t); i = 1, \dots, n;$

$x_i^M(t)$ - фазові координати моделі, що здатна сама налаштуватися.

Це забезпечує достатньо високу швидкодію та не коливальний характер процесу налаштування. Визначивши величини $\varepsilon_i(t)$ як

$$\varepsilon_i(t) = [\prod_{k=1}^i W_k(p, a_{k \ k-1}(t), a_{kn}(t)) - \prod_{k=1}^i W_k^M(p, a_{k \ k-1}(t), a_{kk}(t))]u(t), \quad (2.3)$$

де $Y_k^M(p, a_{k \ k-1}(t), a_{kk}(t))$ - оператор моделі, що здатна налаштуватися самостійно.

Визначив компоненти градієнту показника якості (2.2), по налаштованим параметрам, представляємо алгоритм контуру самоналаштування у вигляді

$$I_i = \lambda_i \{ (1 + q_i p) \varepsilon_i(t) * [(1 + q_i p) \sum_{j=i-l}^i \frac{\prod_{k=l}^i w_k^M(p, a_{kk-l}^M(t) a_{kk}^M(t))}{\partial a_{ij}}] \} u(t) \quad (2.4)$$

де $(1 + q_i p) \sum_{j=i-l}^i \frac{\partial \prod_{k=l}^i w_k^M}{\partial a_{ij}}$ - допоміжний оператор
 λ_i - коефіцієнт посилення контуру налаштування.

Враховуючи, що керуючий вплив $u(t)$ приймає значення $u = \pm 1, u = 0$ вираз (2.3) спрощується та записується так

$$I_i = \lambda_i \{ (1 + q_i p) \varepsilon_i(t) \sum_{j=k-l}^i \frac{\partial \prod_{k=l}^i y_k^M(p, a_{mk-l}^M(t), a_{mk}^M(t))}{\partial a_{ij}} \} u(t) \quad (2.5)$$

згідно з яким структура контурів самоналаштування приймає вигляд, показаний раніше. Суттєве спрощення структури самоналаштовуваної системи досягається при використанні сигналів системи, що еквівалентні у інформаційному сенсі сигналам допоміжного оператора.

В цьому випадку (2.5) перетворюється до вигляду

$$I_i = \lambda_i \{ (1 + q_i p) \varepsilon_i(t) \text{sign} U \} \quad (2.6)$$

2.3 Алгоритм прогнозованого оптимального управління одним класом нестационарних об'єктів

Розглянемо процедуру синтезу контурів самоналаштування на прикладі побудови оптимального по витраті палива регулятора для нестационарного об'єкта другого порядку, що представлений послідовним з'єднанням двох інтегруючих ланок зі змінними коефіцієнтами. Відомо, що для подібних об'єктів, але зі стаціонарними параметрами, оптимальні у сенсі критерію (1.4) керуючі впливи приймають значення ± 1 та 0 у функції стану (x_1, x_2) , що визначаються оптимальними кривими керування.

Крива lol_I подібна звичайній кривій переключення системи оптимальної по швидкодії та описується рівнянням вигляду

$$x_2 = \frac{b_I a_{2I} x_I^2}{2U} \quad (2.7)$$

де b_I та a_{2I} коефіцієнти для інтегрування ланок. Крива por_I розділяє області фазової площини, де відбувається зміна керування з $\pm I$ на 0 та визначається рівнянням

$$x_2 = \frac{k+4}{2k} \frac{b_I a_{2I} x_I^I}{2U} \quad (2.8)$$

Рівняння контурів самоналаштування у співвідношенні з (2.5) у цьому випадку буде записано наступним чином

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1 \{ (I + q_1 p) \varepsilon_1(t) \left[\frac{I}{p} (I + q_1 p) u(t) \right] \} \\ I_2 &= \lambda_2 \{ (I + q_2 p) \varepsilon_2(t) \left[\frac{b_I}{p^2} (I + q_2 p) u(t) \right] \} \end{aligned} \quad (2.9)$$

У момент отримання на вхід системи впливу, що задається $g(t)$ логічний пристрій виробляє сигнал керування згідно знаку помилки:

$$U^* = -\text{sign} x_2 \quad (2.10)$$

чим забезпечується рух об'єкту у потрібному напрямку, тобто до кінцевого стану $x_I = x_2 = 0$, якщо $\text{sign} x_I \neq \text{sign} x_2$, що відповідає знаходженню зображаючої точки фазової площини $x_I x_2$, то включається прогнозуючий пристрій, який при початкових умовах, що рівні даним координатам об'єкту $x_I(t)$, $x_2(t)$ та керуючим $U_M = (-I)U$ визначає прогнозуючі значення координат $x_{I_{np}}$ та $x_{2_{np}}$. Рівняння динаміки пришвидщеної моделі у цьому випадку відрізняється від рівнянь руху об'єкту, а прогнозуюча фазова траєкторія описується виразом типу (2.8) з постійною інтегрування

$C = c[x_1(t), x_2(t)]$ як функція фазових координат об'єкту. Як тільки прогнозуюча фазова траєкторія задовольняє заданим граничним умовам, тобто співпадає з кривою por_1 або pd , керування $U^*(t)$ стає рівним 0 та настає вільний рух системи. Рівняння динаміки прогнозуючої моделі та об'єкту у даному випадку однакові та модель при тому ж керуючому впливі, що й раніше ($+I$ або $-I$) прогнозує рух об'єкта по траєкторії вигляду (2.7) з постійною інтегрування $C = C^0(x_1(t), x_2(t))$. При співпадинні прогнозуючої траєкторії з кривою перемикавання $L0$ або L_10 , що встановлюється рівністю

$$x_2 = 0 \quad \text{при} \quad x_1 = 0$$

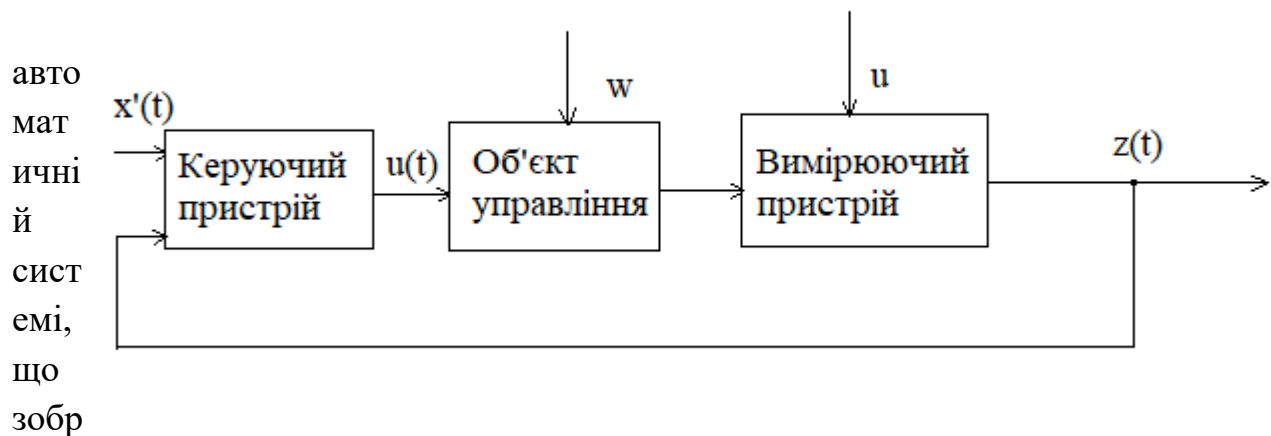
відбувається зміна значення керуючого впливу, який стає рівним або $+I$ або I .

У загальному випадку, коли параметри об'єкту у моделі відрізняються, то траєкторія руху самоналаштовуючої моделі не співпадає з траєкторією руху об'єкту, в результаті чого виникають сигнали помилок ε_1 та ε_2 . Це у свою чергу викликає підлаштування параметрів прогнозуючої моделі, а значить і зміну значень прогнозованих координат.

У підсумку відбувається співпадиння прогнозованих траєкторій та оптимальних кривих керування, чим і досягається оптимальність процесів у сенсі критерію (1.4) у нестационарних системах регулювання.

2.4 Функціональна структура адаптивної оптимальної системи управління (АОСУ) нестационарним об'єктом

У загальному випадку автоматична система складається з об'єкту управління та сукупності пристроїв, що забезпечують керування цим об'єктом. Як правило, така сукупність пристроїв включає в себе вимірювальні пристрої, посилюючі та перетворюючі пристрої та виконуючі пристрої. Якщо об'єднати такі типи пристроїв до однієї ланки, що називається керуючим пристроєм, то структурна схема автоматичної системи буде мати наступний вигляд.



Вимірюючий пристрій надає інформацію про стан об'єкта. Якщо на основі вектору виміру $z(t)$ можуть бути знайдені значення всіх координат стану $x_i(t)$, то система буде повністю спостережуваною. Якщо деякі з координат стану $x_i(t)$ не можуть бути знайдені при відомому значенні вектору виміру $z(t)$, то система буде не повністю спостережуваною. Керуючий пристрій виробляє керуючий вплив $u(t)$.

Таких керуючих впливів може бути декілька, тому розуміємо, що $u(t) \in r$ - мірною векторною величиною.

$$u(t) = \{u_1(t), \dots, u_r(t)\}$$

На вхід керуючого пристрою поступає заданий вплив x^* , який містить інформацію про те, який має бути стан об'єкта - так званий "бажаний" стан об'єкта.

На об'єкт керування може поступати збурюючий вплив ω , що представляє навантаження або перешкоду. Вимір координат об'єкту вимірювальним пристроєм може виконуватися з деякими випадковими похибками v , що називаються шумами виміру.

Задачею керуючого пристрою є вироблення такого керуючого впливу

$u(t)$, щоб якість функціонування автоматичної системи у цілому була б найкращою у деякому сенсі.

Звісно ж ми будемо розглядати такі об'єкти керування, які є керованими, тобто вектор стану яких можна змінювати потрібним чином шляхом відповідної зміни вектора управління.

Наприклад, положення літального апарата характеризується шістьма координатами стану - трьома координатами x_u, y_u, z_u центром тяжіння, та трьома кутовими координатами ψ, ϑ та γ , що визначають нахил літального апарату відносно непорушної системи координат з початком у центрі тяжіння. Положення літального апарату можна змінювати за допомогою керма висоти, курсу, елеронів, а також шляхом виміру вектора тяги як по величині, так і по напрямку. Таким чином, вектор керування може бути представлений у вигляді

$$u(t) = \{\delta_n, \delta_r, \delta_e, P\}$$

де δ_n - відхилення рулів висоти, δ_r - відхилення рулів курсу, δ_e - відхилення елеронів, P - вектор тяжіння. Вектор стану у даному випадку буде $x = \{x_u, y_u, z_u, \psi, \vartheta, \gamma\}$. Можливо встановити задачу вибору керування, за допомогою якого літальний апарат переходить від заданого початкового стану x^0 до заданого кінцевого стану x^1 з мінімальною витратою палива або за найкоротший час.

Додаткова складність при вирішенні технічних задач виникає в силу того, що на керуючий вплив та на координати стану об'єкта, як правило накладаються різноманітні обмеження. Так у розглянутому раніше прикладі відхилення рулів обмежені по абсолютній величині:

$$|\delta_n| \leq A_1, |\delta_r| \leq A_2, |\delta_e| \leq A_3$$

величина вектора тяжіння $|P|$ також обмежена. На координати стану та їх похідні накладаються обмеження, пов'язані з допустимими перенавантаженнями, міцністю конструкції, умовами роботи оператора у системі керування та інше.

Далі ці обмеження будуть враховані при математичному формулюванні задачі оптимального керування. Слід зазначити, що надалі зовнішні впливи ω та ν , що не підлягають виміру, при розгляді задач оптимального керування не враховуються. Крім того, у якості об'єктів для

розгляду будуть використані лише об'єкти керування, динаміка яких описується звичайними диференціальними рівняннями.

Розглянемо математичну постановку задачі оптимального керування. Нехай рівняння, що описують поведінку об'єкта керування мають вигляд у векторній формі:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u),$$

де x - вектор стану об'єкта, u - вектор керування, $f(x, u)$ - векторна функція. На вектор керування u накладаються обмеження. Розуміємо, що його значення належать до деякої замкненої області U у r - мірному просторі керувань, тобто у будь який момент часу $u \in U$. Якщо, наприклад, координати вектору керування задовольняють нерівностям

$$-1 \leq u_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, r),$$

то область керувань U представляє собою r - мірний куб. Назвемо допустимим керуванням деяку кусочно-безперервну функцію $u(t)$, значення якої у кожний момент часу t належить області керування U і яка може мати розриви першого роду.

Відзначаємо, що навіть у деяких простих задачах оптимального керування рішення може бути отримано у класі кусочно-безперервних керувань. Для того щоб вибір керування $u(t)$ як функції часу та початкового стану системи x^0 однозначно визначив її рух, потрібно, щоб система рівнянь, розглянута раніше задовольняла умовам теореми існування та єдиничності рішень у тій області простору $X \times U$, в якій розміщені можливі траєкторії системи $x(t)$ та допустимі керування $u(t)^*$. Якщо область зміни є випуклою, то для існування та єдиничності рішень достатньо, щоб функції $f_i(x, u)$ були неперервні по всім аргументам та мали неперервні приватні похідні до змінних $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$. У якості критерію, що характеризує якість процесу керування, оберемо функціонал

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{t_1} f_0(x, u) dt.$$

Відносно підінтегральної функції $f_0(x, u)$ будемо розуміти, що вона неперервна по всім аргументам та має неперервні приватні похідні до змінних $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

Основну задачу визначення оптимального керування можна сформулювати наступним чином. У фазовому просторі X задані початковий x^0 та кінцевий x^1 стани об'єкту керування. Серед усіх допустимих керувань $u(t)$, для яких відповідні траєкторії системи проходять через початковий та кінцевий стани необхідно обрати таке, для якого функціонал

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{t_1} f_0(x, u) dt$$

приймає мінімальне значення. Тут $x(t)$ - рішення системи рівнянь з початковими умовами $x(t_0) = x^0$, що відповідає керуванню $u(t)$, а t_1 - момент часу, для якого $x(t_1) = x^1$.

Другою важливою задачею оптимального керування є синтез оптимального регулятора, тобто визначення оптимального керування u як функції або вектору спостереження z , або вектору стану об'єкта x . Слід зазначити, що в силу обмежень, що накладаються на допустимі керування, сформульовані вище задачі оптимального керування не вирішуються, як правило, методами класичного варіаційного обчислення, не дивлячись на те, що основна задача є типовою задачею на умовний екстремум. Для вирішення задач оптимального керування використовується принцип максимуму та метод динамічного програмування. Однак методами класичного варіаційного обчислення можуть бути вирішені задачі оптимального керування без обмежень на керування і, крім того, деякі задачі з обмеженнями.

Розділ 3. Моделювання процесів адаптивного оптимального управління нестационарним об'єктом

Керування технологічним процесом заключається у автоматичному підтримуванні станів механічного, хімічного або електричного процесу на вказаних рівнях та протидії різним збуренням, що викликані зовнішніми силами. Процес може бути фактично будь-яким набором об'єктів або матеріалів з характеристиками, що вимірюються та піддаються змінам. Стани процесу визначаються в термінах неперервних змінних процесу, таких як витрати, температури та тиски, що можуть змінюватися в будь-який час. Звичні регулятори не завжди можуть ефективно протидіяти координатним або параметричним збуренням технологічного процесу, їх налаштування потребує високої кваліфікації персоналу.

Адаптивні та параметрично оптимальні регулятори покликані нівелювати ці недоліки. Часто вони можуть усувати похибки швидше та з меншими відхиленнями, що дозволяє процесу регулюватися ближче до

його обмежень, де ефективність найвища. Вони можуть обирати режими роботи та власні налаштування автоматично, без втручання людини.

В розділі представлено кілька підходів до специфічної техніки управління процесами. Хоча кожен регулятор процесу являється «адаптивним» в тому сенсі, що він змінює свій вихід у відповідь на зміну похибки, справжній адаптивний контролер налаштовує не тільки свій вихід, але також й основну стратегію керування.

3.1 Формування математичного опису адаптивної оптимальної системи управління нестационарним об'єктом

Сучасний рівень розвитку комп'ютерної техніки, засобів автоматизації та робототехніки дозволяє на практиці вирішувати складні оптимізаційні задачі для нелінійних систем та процесів. До цього класу можна також віднести і задачу синтезу оптимального за витратою палива управління нестационарними динамічними системами, які структурно можуть бути подані послідовним з'єднанням лінійних ланок першого порядку і описуються векторним диференціальним рівнянням наступного виду:

$$\frac{d}{dt}\underline{x}(t) = A(t)\underline{x}(t) + \underline{b}(t)u(t), \quad (1)$$

де: $\underline{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ - n -вимірний вектор стану системи;

$A(t) = [a_{ij}(t)] = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & a_{21}(t) & 0 & 0 & a_{22}(t) & 0 & 0 & 0 & a_{n-1,n}(t) & 0 & 0 & a_{n,n}(t) \end{bmatrix}$ -

матриця коефіцієнтів системи;

$\underline{b}(t) = [b_i(t)] = [b_1(t), 0, 0, \dots, 0]$, n -вимірний вектор стовпець; ($i = \underline{1, n}$)

$u(t)$ - управління, що обмежено умовою:

$$|u| \leq u_{max} \quad (2)$$

Задача управління в даному випадку полягає у визначенні допустимих керуючих впливів, які задовольняють умові (2) та переводять систему (1) на інтервалі часу $[t_0, t_1]$ з початкового стану $\underline{x}(t_0) = \underline{x}^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]$ в кінцевий (термінальний) стан $\underline{x}(t_1) = \underline{x}^1 = [0, 0, \dots, 0]$, забезпечуючи при цьому мінімальне значення функціонала виду

$$F(u, t) = \int_{t_0}^{t_1} (k + |u|) dt, \quad (3),$$

який враховує як витрати палива, так і час траекторного руху системи.

Тут $k > 0$, а значення t_1 заздалегідь не зафіксоване.

Що до функцій $a_{ij}(t)$ та $b_l(t)$, які є коефіцієнтами системи рівнянь (1), то припускаємо, що вони знакопостійні на інтервалі $[0 < t < \infty]$, мають відповідну неперервну похідну та область визначення:

$$a_{ij}^{min} \leq a_{ij}(t) \leq a_{ij}^{max}$$

$$b_l^{min} \leq b_l(t) \leq b_l^{max},$$

при цьому
$$|\dot{a}_{ij}(t)| < \dot{a}_{ij}^{max} \quad (4)$$

$$|\dot{b}_l(t)| < \dot{b}_l^{max}$$

Оскільки для динамічної системи, яка описується рівнянням (1), для будь-якого $t \in (0, \infty)$ виконується умова спільності положення, що відповідає лінійній незалежності наступних векторів

$$Q_1(t) = b_l(t), \quad Q_k(t) = A(t)Q_{k-1} - \frac{d}{dt}Q_{k-1}(t), \quad (5)$$

то згідно [2], дана задача оптимального за витратою палива управління є невинродженою.

Як відомо, принцип максимума Понтрягіна, що дає необхідні умови оптимальності та дозволяє визначити в даному випадку екстремальне управління $u^*(t)$, що абсолютно мінімізує функціонал (3), як кусково-сталу функцію виду

$$u^*(t) = \text{dez}\langle b_I(t)\psi_I(t)\rangle, \quad (6)$$

яка приймає наступні значення:

$$\begin{aligned} u^*(t) &= 0, & \text{при } |b_I(t)\psi_I(t)| < 1, & \quad (7) \\ u^*(t) &= \text{sign}\{b_I(t)\psi_I(t)\} & \text{при } |b_I(t)\psi_I(t)| > 1; \\ 0 \leq u(t) \leq 1, & & \text{при } b_I(t)\psi_I(t) = 1, \quad t \in [T_1, T_2], & \quad (8) \\ -1 \leq u(t) \leq 0, & & \text{при } b_I(t)\psi_I(t) = -1, \quad t \in [T_1, T_2], \\ \text{де } [T_1, T_2] &\subset [t_0, t_1]. \end{aligned}$$

Можна показати, що в силу невинродженої оптимізаційної задачі та лінійності системі (1), випадок (8) має місце лише для скінченного числа $t \in [t_0, t_1]$.

Для подібних за структурою, але стаціонарних, динамічних систем в [3] при розгляді задачі мінімізації витрати палива була встановлена структурна властивість оптимальних процесів, що зветься послідовною оптимальністю і яка полягає в однаковості оптимального управління на відповідних інтервалах часу для повної та скороченої систем. Під останньою розуміється динамічна система, що створюється з вихідної системи (1) вилученням (відкиданням) останнього рівняння динаміки.

Доведемо, що таку ж саме властивість мають і процеси при оптимізації за критерієм (3) і для нестационарних систем виду (1).

Одночасно з динамічної системою (1) будемо розглядати систему, що скорочена на порядок порівняно з вихідної, і описується рівнянням

$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = A(t)\tilde{x}(t) + \tilde{b}(t)u(t), \quad (9)$$

де $\tilde{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{n-1}(t)]$; $(n-1)$ – вимірний вектор стану системи;

$$\begin{aligned} \tilde{A}(t) &= [a_{ij}(t)] = \\ &[a_{11}(t) \ a_{21}(t) \ 0 \ 0 \ a_{22}(t) \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{n-1n-2}(t) \ 0 \ 0 \ a_{n-1n-1}(t)]; \quad (i, j = \underline{1, n-1}); \end{aligned} \quad (10)$$

$\tilde{b}_1(t) = [b_1(t), 0, 0, \dots, 0]$, $(n-1)$ – вимірний вектор стовпець.

Нехай на інтервалі $[t_0, \tau]$ існує допустиме управління, яке забезпечує спочатку екстремальні значення усім фазовим координатам системи (1), а потім здійснює її вільний рух, переводячи її з початкового стану $\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0$ за час $[t_0, \tau]$ в положення $\underline{x}(\tau) = [x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau)]$

.

Крім того вважається, що на інтервалі $[\tau, t_1]$ також існує допустиме управління $u^*(t)$, яке здійснює перевід, мінімізуючи критерій витрати палива (3), скорочену систему (9) зі стану $\tilde{x}(\tau) = [x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_{n-1}(\tau)]$ в кінцеве положення, що визначається термінальними рівновагами, зокрема нульовими, значеннями змінних $\tilde{x}(t_1) = \tilde{x}^l = [x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_{n-1}(t_1)] = [0, 0, \dots, 0]$.

Суттєвим є те, що при такому характері руху фазова координата $x_n(t)$ вихідної системи (1) змінює свої значення з $x_n(\tau)$ до кінцевого рівновагового $x_n(t_1) = x_n^l = 0$, а фазова траєкторія $\underline{x}(t)$ і управління $u^*(t)$ повної системи на всьому інтервалі $[t_0, t_1]$ є послідовно оптимальні та задовольняють принципу максимуму [1,2]. Таким чином, вище отримані результати дозволяють стверджувати, що для даного класу нестационарних систем управління, як і для подібних стаціонарних систем,

має місце відповідна структурна властивість оптимальних за витратами палива процесів управління.

Тоді з встановленої структурної властивості витікає, що оптимальне за витратою палива управління системами виду (1) може здійснюватися за допомогою оптимального управління скороченою на порядок системою виду (9).

При цьому на першому етапі завдання(уставка), що подається на вхід оптимального регулятора для скороченої системи, повинне відповідати спочатку руху системи до екстремального значення однієї з фазових координат, а потім забезпечувати вільний траєкторний рух системи.

На другому етапі оптимального управління уставка регулятора змінюється з метою переведення скороченої системи (9) з мінімізацією витрати палива в задане значення по $(n-1)$ -ій координаті, що відповідає рівноважному стану системи. Застосовуючи цей підхід до об'єктів $(n-1)$ -го, $(n-2)$ -го, $(n-3)$ -го... і т. д. порядків, приходимо до сукупності оптимальних траєкторій, що характеризуються моментами $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_{n-1}$ зміни завдань (уставок) оптимальному регулятору скороченої системи. При цьому структурна схема оптимального за витратою палива регулятора для лінійної не стаціонарної системи n -го порядку, яка побудована на основі описаного вище правила послідовного скорочення порядку об'єкту і принципу прогнозування, що виглядає наступним чином:

1. До складу оптимального регулятора входить сукупність з $(n-1)$ -х прогнозуючих пристроїв $ПП_1, ПП_2, \dots, ПП_{n-1}$, які працюють у прискореному темпі з періодизацією рішень разом з відповідними логічними блоками $ЛБ_1, ЛБ_2, \dots, ЛБ_{n-1}$

2. Система з $(n-1)$ –х прогнозуючих пристроїв $ПП_i$ ($i = \underline{1, n-1}$) дозволяє періодично отримувати, так звані, прогнозовані значення фазових координат, починаючи з координати $x_2(t)$, як і відповідають оптимальному за витратою палива руху скороченого на відповідне число порядків об'єкту з поточного стану до заданого рівновагового стану;

3. Логічні блоки $ЛБ_i$ ($i = \underline{1, n-1}$) призначені для формування оптимальних керуючих впливів для системи прогнозуючих пристроїв $ПП_i$ ($i = \underline{1, n-1}$), що забезпечує їх оптимальний за витратою палива траєкторний рух, який складається з $(n-1)$ -ої послідовності траєкторних ділянок типу «розгін-вільний рух-гальмування», на основі відпрацьовування відповідних значень уставок, що формуються для них логічним блоком $ЛБ_n$, який крім того здійснює перевірку виконання прогнозуючими пристроями $ПП_i$ ($i = \underline{1, n-1}$) заданих граничних умов і синтезує оптимальні керуючі впливи, що подаються на об'єкт.

Як відомо, реалізація будь-якого автоматичного регулятора, і оптимального за витратою палива зокрема, вимагає знання поточних значень параметрів об'єкту керування. Оскільки для нестационарних систем характер зміни параметрів априорі невідомий, то при оптимізації їх управління слід вирішувати задачі параметричної ідентифікації та відповідного налаштування оптимального регулятора. При використанні прогнозованого управління це стає можливим здійснити на основі метода слідкуючої моделі з градієнтною процедурою налаштування як її самої, так і створеного оптимального регулятора [4,5].

Для вирішення задачі синтезу адаптивного оптимального регулятора використовуємо операторну форму подання математичної моделі нестационарної системи виду (1), яка, по суті, включає в себе як об'єкт керування, так і незмінну частину оптимального регулятора:

$$x_n(t) = W(p, \tilde{a}_{ij})u(t), (i, j = \underline{1, n}) \quad (11)$$

$$\text{де } p = \frac{d}{dt}; \quad \tilde{a}_{ij} = \tilde{a}_{ij}(\vartheta), \text{ при } \forall \vartheta = t \in [t_0, t_1]; \quad (12)$$

$W(p, \tilde{a}_{ij}) = \prod_l^n W_i(p, \tilde{a}_{ij})$ – «квазістаціонарний» оператор динамічної системи (1) при визначенні його параметрів миттєвими значеннями функцій $a_{ij}(t)$ згідно до (12).

Припускаючи, що координати $x_i(t)$, $t \in [t_0, t_1]$ об'єкту доступні для спостереження та вимірювання, обираємо як критерій якості параметричної ідентифікації функціонал виду

$$J_i(t) = \{(\varepsilon_i^2(t) + q_i \dot{\varepsilon}_i^2(t))\} = \min, \quad (13)$$

$$\text{де } \varepsilon_i(t) = x_i(t) - x_i^M(t);$$

$$x_i^M(t) - \text{фазові координати сліdkуючої моделі, } i = \underline{[1, n]};$$

що забезпечує досить високу швидкодію та не коливальний характер процесу параметричного самоналагоджування. Якщо тепер подати величини $\varepsilon_i(t)$ як

$$\varepsilon_i(t) = \{\prod_{k=l}^i W_k(p, \tilde{a}_{kk-l}, \tilde{a}_{kk}) - \prod_{k=l}^i W_k^M(p, \tilde{a}_{kk-l}^M, \tilde{a}_{kk}^M)\}u(t), \quad (14)$$

$$i = \underline{[1, n]}$$

де $W_k^M(p, \tilde{a}_{kk-l}^M, \tilde{a}_{kk}^M)$ - оператор самоналагоджуючої моделі оптимального регулятора; то це дозволить отримати компоненти градієнту показника якості (13) по параметрам, що налагоджуються, і у підсумку визначити алгоритм контуру самоналагоджування у такому вигляді:

$$\forall J_i = \lambda_i \{ (1 + q_i p) \varepsilon_i(t) [(1 + q_i p) \sum_{j=i-l}^i \frac{\partial \prod_{k=l}^i W_k^M}{\partial \tilde{a}_{ij}} (p, \tilde{a}_{kk-l}^M, \tilde{a}_{kk}^M)] \} u(t), \quad (15)$$

$$i = \underline{[1, n]}$$

$$\text{де } (1 + q_i p) \sum_{j=i-l}^i \frac{\partial \prod_{k=l}^i W_k^M}{\partial \tilde{a}_{ij}} - \text{допоміжний оператор;}$$

λ_i - коефіцієнт підсилення (пропорційності) контуру самоналагоджування.

Враховуючи, що управління $u(t)$ приймає значення $u=\{+1,0,-1\}$ вираз (15) спрощується та записується так:

$$\nabla J_i = \lambda_i \{ (1 + q_i p) \varepsilon_i(t) \sum_{j=i-1}^i \frac{\partial \Pi_{k=l}^i W_k^m}{\partial \tilde{a}_{ij}} (p, \tilde{a}_{kk-l}^m, \tilde{a}_{kk}^m) \} \quad (16)$$

$$i = \underline{[1, n]}$$

Суттєве спрощення структури адаптивного регулятора досягається при використанні сигналів системи, еквівалентних у інформаційному сенсі сигналам допоміжного оператора. В цьому випадку вираз (16) трансформується до виду

$$\nabla J_i = \lambda_i \{ (1 + q_i p) \varepsilon_i(t) \text{sign}\{u(t)\}, \quad (17)$$

що спрощує контур самоналагоджування.

Аналіз оптимальних за витратою палива процесів в нестационарних системах n -го порядку дав можливість визначити їх послідовну оптимальність, що дозволило при вирішенні задачі синтезу оптимального управління використати принцип прогнозування. Для параметричної ідентифікації нестационарних об'єктів при оптимізації їх за витратою палива були використані контури самоналагоджування, синтезовані на основі метода допоміжного оператора. Головною перевагою запропонованого алгоритму адаптації є відсутність пошукових коливань і висока збіжність процесу самоналагоджування.

3.2 Результати моделювання адаптивної оптимальної системи управління нестационарним об'єктом

У даному розділі керування синтезується на основі методу прогнозування разом з параметричною ідентифікацією об'єкту та екстрапонуванням зміни параметрів об'єкту на заданому інтервалі часу.

Для покращення якості систем керування нестаціонарними об'єктами пропонується застосовувати адаптивні принципи керування.

Розглядається клас лінійних нестаціонарних систем виду

$$\begin{aligned}x_1(t) &= a(t)x_2(t); \\x_2(t) &= u(t),\end{aligned}\tag{1}$$

де $u(t)$ - керуючий вплив, що обмежений умовою

$$|u| \leq u_M.\tag{2}$$

Початковий стан системи $x_1(t_0) = x_1^0, x_2(t_0) = x_2^0$, кінцеве $x_1(T) = 0, x_2(T) = 0$.

Припустимо, що коефіцієнт посилення системи, що входить у вираз (1), знакопостійний, виключно монотонний, має неперервну першу похідну та регулярний характер зміни у часі, при цьому область його визначення

$$a^{min} \leq a(t) \leq a^{max}, |a(t)| < a^{max}.\tag{3}$$

Для системи (1), структурно представленій послідовним з'єднанням лінійних нестаціонарних ланок першого порядку, при умовах (2) та (3) і не заданому характері зміни параметра $a(t)$ необхідно синтезувати керування, що мінімізує функціонал

$$J = \int_0^T [k + |u|]dt,\tag{4}$$

де час переходу T не задано і $k > 0$. Гамільтоніан H цієї системи

$$H = k + |u(t)| + x_2(t)a(t)p_1(t) + u(t)p_2(t).\tag{5}$$

Додаткові змінні $p_1(t)$ та $p_2(t)$ є рішенням системи рівнянь

$$p_1(t) = -\partial H / \partial x_1(t) = 0;\tag{6}$$

$$p_2(t) = -\partial H / \partial x_2(t) = 0.\tag{7}$$

Розуміючи $\pi_1 = p_1(0)$ та $\pi_2 = p_2(0)$, знайдемо

$$p_1(t) = \pi_1, p_2(t) = \pi_2 - \pi_1 \int_0^t a(t)dt.$$

(8)

Керування, що мінімізує гамільтоніан,

$$u(t) = 0, \text{ якщо } |p_2(t)| < 1; \quad (9)$$

$$u(t) = -\text{sign}\{p_2(t)\}, \text{ якщо } |p_2(t)| > 1; \quad (10)$$

$$0 \leq u(t) \leq 1, \text{ якщо } p_2(t) = 1; \quad (11)$$

$$-1 \leq u(t) \leq 0, \text{ якщо } p_2(t) = -1. \quad (12)$$

При цьому, якщо $|p_2(t)| = 1$ для будь якого t на деякому інтервалі (t_1, t_2) , то керування не єдине.

Лема 1 та 2 встановлюють єдинність та послідовність керуючих впливів.

Лема 1. $|p_2(t)|$ не може бути рівним одиниці ні на жодному інтервалі (t_1, t_2) . Звідси слідує, що вироджене керування не може бути оптимальне і цьому задача нормальна.

Лема 2. Якщо бажаним кінцевим станом є початок координат $(0, 0)$, то оптимальними можуть бути тільки шість керуючих послідовностей $\{+1\}$; $\{-1\}$; $\{0, +1\}$; $\{0, -1\}$; $\{+1, 0, -1\}$; $\{-1, 0, +1\}$. Керуючі послідовності $\{-1\}$; $\{0, +1\}$ є підпослідовністю керуючої послідовності $\{-1, 0, +1\}$, а керуючі послідовності $\{-1\}$; $\{-1\}$; - підпослідовностями з $\{+1, 0, -1\}$.

По принципу оптимальності, якщо вся послідовність оптимальна, то і будь яка підпослідовність із неї має бути оптимальна.

У моменти перемикання t_1 та t_2 маємо

$$p_2(t_1) = 1 = \pi_2 - \pi_1 \int_0^{t_1} a(t)dt; \quad (13)$$

$$p_2(t_2) = -1 = \pi_2 - \pi_1 \int_0^{t_2} a(t)dt.$$

(14)

Гамільтоніан має бути рівний нулю при будь якому $t \in [0, T]$. При $t = t_1$ маємо

$$x(t_1) = z_1, x_2(t_2) = z_2, p_2(t_1) = 1, u(t_1) \leq 0. \quad (15)$$

Підставив рівняння (15) у співвідношення (5), отримаємо

$$H_{|t=t_1|} = 0 = k + z_2 a(t_1) \pi_1, \quad (16)$$

звідки

$$\pi_1 = -k z_2 a(t_1). \quad (17)$$

Віднімемо рівняння (14) з виразу (13):

$$\pi_1 \int_{t_1}^{t_2} d(t) dt = 2, \quad (18)$$

звідси слідує,

$$\int_{t_1}^{t_2} d(t) dt = \frac{2z_2 a(t)}{k}. \quad (19)$$

Для отримання оптимального по витраті палива алгоритму керування необхідно знайти залежність між лініями перемикання оптимальних по витраті палива та швидкодії систем керувань. Для цього знайдемо рівняння лінії перемикання оптимальної по швидкодії системи виду

$$\begin{aligned} \omega_2(t) &= u; \\ \omega_1(t) &= \omega_2(t) a(t). \end{aligned} \quad (20)$$

Переходячи до оберненого часу $l = T - t$, отримаємо

$$\begin{aligned} \omega_2(l) &= -u; \\ \omega_1(l) &= -\omega_2(l) a(l). \end{aligned} \quad (21)$$

Оптимальна лінія перемикання буде мати вигляд

$$\omega_1 = u \int \omega_2 a\left(-\frac{\omega_2}{u}\right) d\omega_2. \quad (22)$$

При цьому

$$\begin{aligned} \omega_2 &= z_2; \\ \omega_1 &= z_1 + z_2 \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt, \end{aligned} \quad (23)$$

де z_1 і z_2 - фазові координати лінії перемикання оптимальної по витраті палива системі керування.

Тоді підставляючи рівняння (19), (22) до співвідношення (23), отримаємо

$$z_1 - \frac{2z_2^2 a(t_1)}{k} = u \int z_2 a\left(-\frac{z_2}{u}\right) dz_2. \quad (24)$$

Так як фактично $a\left(-\frac{z_2}{u}\right) = a(t_2)$, то

$$z_1 = u \int z_2 a(t_2) \left(1 + \frac{u}{k} * \frac{a(t_1)}{a(t_2)}\right) dz_2. \quad (25)$$

Визначимо

$$k(x_1^0, x_2^0) = 1 + \frac{4u}{k} a(t_1)/a(t_2), \quad (26)$$

тоді вираз (25) є лінією перемикання системи, що оптимальна по швидкодії

$$x_1(t) = a(t)k(x_1^0, x_2^0) x_2(t), \quad x_2(t) = u(t). \quad (27)$$

Моменти перемикання t_1 та t_2 визначаються на основі прогнозування у прискореному масштабі з використанням параметричної ідентифікації та екстраполяції змінного параметра на інтервал часу прогнозування.

Алгоритм налаштування підслідкуючої моделі. У даній роботі для цілей параметричної ідентифікації системи використовувався метод підслідкуючої моделі з градієнтною процедурою налаштування параметрів. Алгоритм налаштування при критерію близькості процесів у об'єкті та моделі виду

$$\begin{aligned} \min J &= \min(\varepsilon + q\varepsilon)^2; \\ \varepsilon(t) &= x_1(t) - x_1^M(t), \end{aligned} \quad (28)$$

(де q - ваговий коефіцієнт) буде наступним:

$$\nabla J = -\lambda\{(\varepsilon + q\varepsilon)1/p^2\}, \quad (29)$$

де ∇J - градієнт показника якості, що визначає швидкість зміни параметра; λ - коефіцієнт посилення контуру налаштування.

Розглядаючи процес параметричної ідентифікації на інтервалі часу (t_0, t) , де t_0 - початковий, а t - дійсний моменти часу, визначаємо зміни параметра підслідкуючої моделі:

$$a^M(t) = a^M(t_0) + \int_{t_0}^t \nabla J dt. \quad (30)$$

Алгоритм екстраполяції та оцінка точності. Вираз (30) дає оцінку невідомого параметра $a(t)$ об'єкта тільки у даний момент часу, що є недостатнім для використання методу прогнозування при синтезі оптимальних керувань. Тому значення $a(t)$ у кожний момент часу $t_k (k = 1, 2, \dots, n)$ подаються у екстраполятор параметру прогнозуючої моделі, де обчислюються значення $a(t_k + m\Delta t)$ (Δt - обраний крок дискретності, m - кількість кроків прогнозування).

Алгоритм екстраполяції може бути побудований на основі інтерполяційної формули Лагранжа - Ейткена, що має вигляд

$$L_{0,1,2,\dots,n}(t) = \frac{1}{t_n - t_0} |L_{0,1,2,\dots,n-1}t_0 - t| \quad (31)$$

$$|L_{1,2,3,\dots,n}t_n - t|$$

Похибка методу складає

$$|a(t) - L_n(t)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} |(t - t_0) \dots (t - t_n)|;$$

$$M_{n+1} = \sup_{\tau \in [t_0, t]} |^{(n+1)}a(\tau)|.$$

Кількість членів екстраполяційної формули визначається виходячи з потрібної точності вирішення.

Алгоритм оптимального керування. Як уже відмічалось, моменти перемикання t_1, t_2 визначаються за допомогою “швидкої” моделі, рух якої описується системою диференціальних рівнянь

$$x_1(v) = a(v)k(x_1^0, x_2^0)x_2(v), x_2(v) = -u(t), \quad (32)$$

де $v = t_k + m\Delta t$.

Вихідні координати об’єкта слугують початковими умовами для “швидкої” моделі на кожному також, момент закінчення якого визначається умовою.

$$|x_2(v)| < \varepsilon_1 \quad (33)$$

де ε - зона нечутливості.

Коефіцієнт $k(x_1^0, x_2^0)$ на інтервалі часу $[0, t_1]$ визначається виразом (26), однак при цьому для роботи прогнозуючої моделі у момент t_1 необхідно знати значення $a(t_2)$ ($a(t_1)$ - визначається дійсним часом).

Для визначення $a(t_2)$ модель робить крок з $u = 0$ та $k(x_1^0, x_2^0) = 1$, після чого вона рухається згідно виразу (32) при $k = 1$ до моменту виконання умови (33).

Значення $a(t_2)$ визначається в момент, коли

$$|x_2(v)| < \varepsilon; \quad |x_1(v)| < \varepsilon, \quad (34)$$

після чого “швидка” модель починає прогнозувати з моменту часу t_1 , з початковими умовами $x(t_1), x(t_2)$ та рухається згідно виразу (32) до виконання співвідносин (33) та (34). Виконання умови (34) означає при цьому першому перемикавню об’єкта з $|u| = 1$ на $u = 0$. У подальшому рух моделі описується системою (32) при $k(x_1^0, x_2^0) = 1$. Момент виконання умови (34) буде відповідати другому перемикавню.

Розділ 4. Стартап. Розробка адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об’єктом другого порядку

Стартап як форма малого ризикового підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар’єрів входу в ринок і вважається однією з головних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів зростає загальна маса інноваційних ідей.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка.

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи

проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів.

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації. Проаналізуємо стартап з розробки адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об'єктом другого порядку.

4.1 Опис ідеї проекту

Адаптивне керування є одним із розділів сучасної теорії автоматичного керування. Задачею теорії адаптивних систем є аналіз та синтез в умовах неповної апріорної інформації про об'єкт та зовнішні впливи. Неточність математичної моделі, зміна параметрів об'єкта в процесі функціонування, наявність шумів вимірювання знижують ефективність використання традиційних методів теорії автоматичного керування. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні систем, що не потребують повної інформації про об'єкт та умови його експлуатації. Адаптивні системи дають змогу накопичувати та обробляти інформацію про поведінку об'єкта у реальному часі. Ця особливість дає змогу знизити недоліки нестачі інформації про систему під час її проектування.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки	Вигоди для
------------	----------	------------

	застосування	користувача
Розробка адаптивної оптимальної за витратою палива системи управління нестационарним об'єктом другого порядку	Нестационарні та стаціонарні об'єкти	Адаптивність системи
		Економія палива
		Оптимальність створеної структури

Створення адаптивної системи з самоналагоджувальним керуючим пристроєм є актуальною задачею сучасної теорії автоматичного управління у зв'язку з необхідністю керувати об'єктами зі змінними параметрами.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Проекти конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Експерт			
1.	Простота використання	-	+	+		
2.	Швидкість роботи	+	-			+
3.	Вартість	+	-			+

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Необхідно провести аудит проекту, за допомогою якого можна реалізувати ідею проекту. Технологічна здійсненність ідеї проекту представлена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Розробити систему управління об'єктом, що є адаптивною за витратою палива, та дозволить користувачу налаштувати її для власних потреб	Метод прогнозування, метод адаптації	Наявні	Доступні

Огляд таблиці 4.3 показав, що технологічна реалізація проекту можлива, наведені технології присутні на ринку.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному параграфі проведено визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє планувати напрями розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів.

Розглянемо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Впровадження систем адаптивного управління	Дослідники та розробники систем адаптивного управління об'єктами	Проведення наукових досліджень та створення систем що використовують наведені методи реалізації	Швидкість та легкість налаштування системи управління до конкретного об'єкта

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища. Тому складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.5-4.6).

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
--------------	---------------	----------------------	---------------------------------

1.	Інтеграція з існуючими системами адаптивного управління	Нема потреби у продукті	Відмова у співробітництві
----	---	-------------------------	---------------------------

Таблиця 4.6 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Політика протекціонізму	Захист вітчизняного виробника внаслідок чого буде розвиватися галузь споживача стартапу	Залучення у коло споживачів споріднених галузей
2.	Стимулювання розвитку інноваційного підприємництва	Зменшення податкового тиску на стартапи	Масштабування стартапу

Проводимо аналіз пропозиції: визначаємо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.7).

Оцінка привабливості стратегічної зони господарювання стартапу була проведена із застосуванням методу Дельфі.

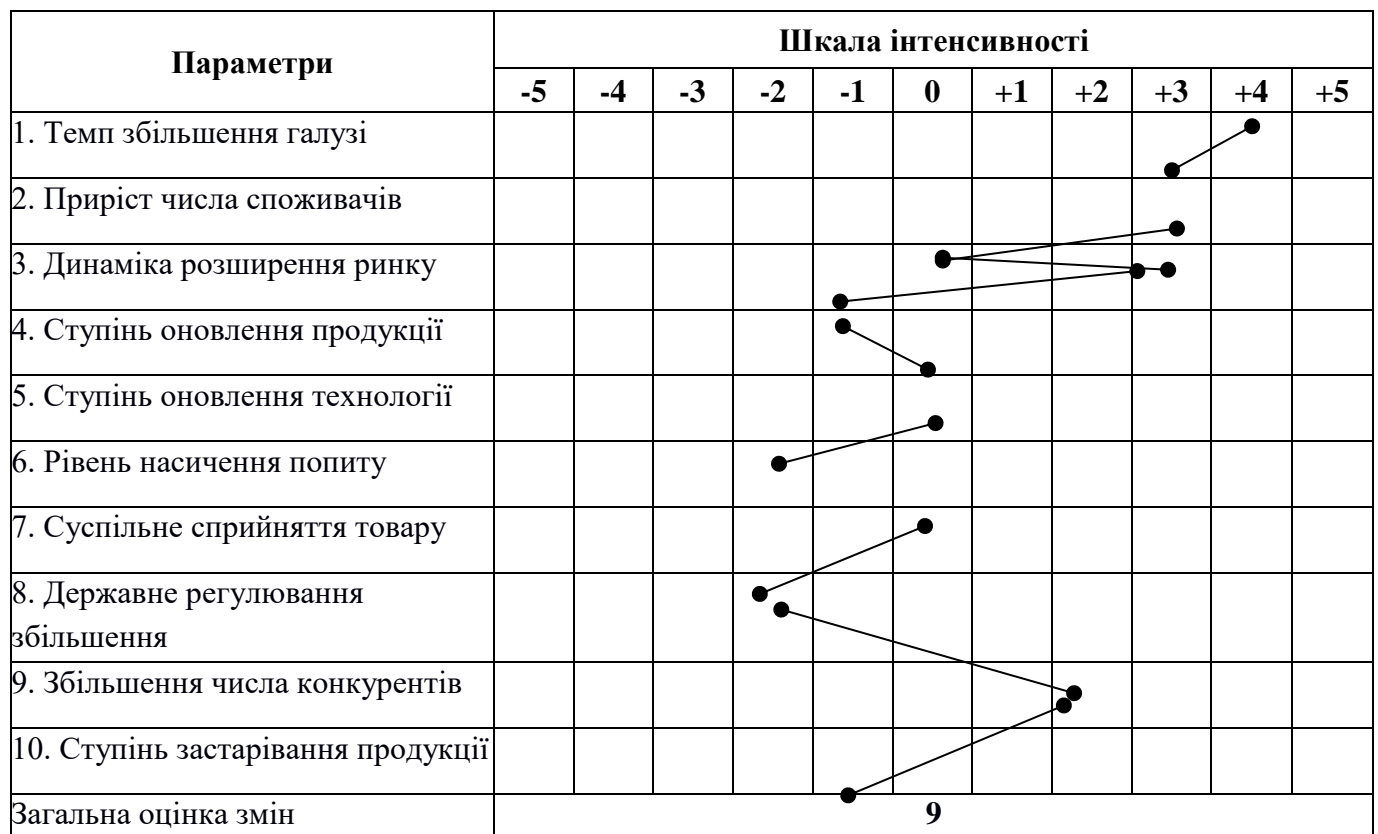
На першому етапі була проведена оцінка зміни в прогнозованому збільшенні стратегічної зони господарювання (G) методом Дельфі.

Таблиця 4.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№ п/ п	Особливості конкурентног о середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1.	Тип конкуренції: олігополія	Ринок розділений між невеликим числом конкурентів(2-100).	Існує вхідний бар'єр для аутсайдерів, тому необхідно забезпечити надійність і прийнятну ціну.
2.	За рівнем конкурентної боротьби: національний	Діяльність підприємства не залежить від його місцезнаходження.	Центр боротьби все більше переміщується зі сфери обігу у сферу виробництва.
3.	За галузевою ознакою: міжгалузева	Урахування особливостей конкурентного середовища у кожній галузі, з якою взаємодіє стартап.	Внутрішньогалузева конкуренція сприяє вищій нормі прибутку, яка у різних галузях має різну величину.
4.	Конкуренція за видами товарів: товарно-родова	Товарна-родова конкуренція представляє собою різноманітні шляхи виконання певної задачі, тобто функціональна конкуренція.	Спостерігати за поведінкою конкуруючих фірм і своєчасно вживати необхідних заходів для забезпечення власних переваг.
5.	За характером конкурентних переваг: цінова	Діє правило цінової привабливості: якщо ціна на один з товарів зростає, збільшується попит на інший, що є його замінником. У результаті відбувається	Успіх товарів-замінників тим реальніша, чим більше: кількість ефективних замінників виробленого товару; обсяг виробництва товарів- замінників;

		переорієнтація покупців на виробників, що пропонують вирішення споживчих проблем більш дешевим способом.	різниця в цінах між виробом-оригіналом і товарами-замінниками на користь останніх.
6.	За інтенсивністю: марочна	Марочний товар володіє рядом переваг, тому що несе в собі певну гарантію і є засобом установлення добрих відносин із клієнтом.	Відома марка захищає від нелегальної імітації й стимулює закупівлі оптових і роздрібних мереж.

Таблиця 4.8 – Аналізи зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ (G)



На другому етапі проведено оцінку прогнозованих тенденцій зміни рентабельності СЗГ (G) (табл. 4.8).

На третьому етапі визначимо рівень впливу загроз ($-Q_i$) і використання можливостей ($+Q_i$) зовнішнього середовища для

підприємства в даній СЗГ (табл. 4.9). Оцінювання кожного чинника відбувається за шкалою від -5 до +5 балів. Зважена оцінка визначається як результат множення оцінки чинника, значущості групи факторів та значущості чинника в групі, до якої даний чинник належить. Негативна зважена оцінка розглядається як потенційна загроза, а позитивна – як можливість для організації в даній СЗГ.

Таблиця 4.9 – Аналіз оцінки змін рентабельності СЗГ (*P*)

Параметри	Шкала інтенсивності										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
1. Коливання рентабельності											
2. Коливання цін											
3. Коливання об'ємів продажів											
4. Рівень попиту до потужностей											
5. Концепція ринку											
6. Стабільність структури ринку											
7. Оновлення складу продукції											
8. Вплив конкурентів											
9. Рівень задоволення замовником											
10. Державне регулювання діяльності організації											
Загальна оцінка змін рентабельності на перспективу	20										

Таблиця 4.10 – Оцінка зовнішніх загроз і можливостей для підприємства

Група чинників	Чинники	Значущість групи чинників	Значущість чинника в групі	Оцінка чинника	Зважена оцінка	
					загрози	можливості
1	2	3	4	5	6	7
Економічні	Темпи інфляції	2,5	0,17	4		1,7
	Стабільність курсу гривни		0,38	3		2,85
	Тарифи на транспорт і енергоресурси		0,25	-3	-1,875	
	Податкові ставки		0,2	-2	-1	
	Державне регулювання ринків		0,21	4		0,42
	Інвестиційна політика		0,25	3		0,225
Політичні	Політична стабільність	0,5	5,18	-3	-0,17	
	Законодавча база для регулювання підприємницької діяльності		0,26	0	0	
Ринкові	Інтенсивність конкуренції	1,5	0,18	2		0,54
	Ціни на		0,25	1		0,375

	чинники виробництва					
	Укладення прямих договорів		0,43	-4	-2,58	
	Динаміка попиту і пропозиції		0,14	3		0,63

Продовження таблиці 4.10

1	2	3	4	5	6	7
Чинники конкуренції	Агресивність конкуренції	1,5	0,35	4		2,1
	Тенденції зміни числа конкурентів		0,45	-3	-2,025	
	Переваги лідерів галузі		0,2	3		0,9
Виробничо-технологічні	Стан виробництва	2,5	0,21	-2	-1,05	
	Можливість нових технологічних розробок		0,32	1		0,8
	Рівень технології конкурентів		0,17	3		1,275
	Доступність ресурсів		0,3	-2	-1,5	
Соціальні	Соціальна напруженість в галузі	1	0,35	2		1,05
	Підвищення кваліфікації кадрів		0,27	4		1,62

	Юридичні обмеження в бізнесі		0,38	-2	-1,14	
Підсумкова оцінка	10	-	-	-11,44	14,785	

На підставі отриманих результатів розраховано значення привабливості СЗГ за формулою:

$$СЗГ = \alpha G + \beta P + \gamma * (\pm Q_i - T), \quad (4.1)$$

де $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,3$, $\gamma = 0,3$;

G – зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ;

P – зміни в рентабельності СЗГ;

$+Q_i$ та $-Q_i$ – відповідно оцінки можливостей та загроз для організації.

Значення привабливості наведено в формулі 6.2.

$$СЗГ = 0,4 * 9 + 0,3 * 20 + 0,3 * (14,785 - 11,44) = 12,945 \quad (6.2)$$

На четвертому етапі оцінюємо рівень привабливості за відповідною шкалою (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Шкала оцінювання привабливості СЗГ

Значення	Характеристика
-50÷-46	Дуже неприваблива
-45÷-36	Високо неприваблива
-35÷-26	Достатньо неприваблива
-25÷-16	Помірно неприваблива
-15÷-6	Майже неприваблива
-5÷0÷+5	Відсутність привабливості
+6÷+15	Майже приваблива
+16÷+25	Помірно приваблива
+26÷+35	Достатньо приваблива
+36÷+45	Високо приваблива

$+46 \div +50$	Дуже приваблива
----------------	-----------------

Значення привабливості СЗГ (12,945) потрапляє в інтервал від 6 до 15, що може вважатися майже привабливим для підприємства. Позитивно слід оцінювати спрямованість показників G та P, які свідчать про непогані перспективи діяльності підприємства в даній СЗГ.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей (табл. 4.12).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● інвестиційна привабливість підприємства; ● зважена цінова політика; ● врахування потреб споживачів. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● частка ринку; ● результативність рекламної політики; ● організація системи комунікацій.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● пришвидшення процесу дослідження та розробки; ● інтеграція в існуючі системи на базі штучного інтелекту. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● недосконалість та змінюваність законодавства; ● інфляційні процеси.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу.	вище середньої	1 рік
2.	Стратегія посилення сильних сторін за рахунок ринкових можливостей.	висока	8 місяців
3.	Стратегія компенсації слабких сторін наявними ринковими можливостями.	середня	1,5 роки
	Стратегія виходу з ринку	низька	не має

Обираємо стратегію посилення сильних сторін за рахунок ринкових можливостей.

Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю	Готовність	Орієнтовний	Інтенсивність	Простота
--------------	------------	-------------	---------------	----------

цільової групи потенційних клієнтів	споживачів сприйняти продукт	попит межах цільової групи	конкуренції в сегменті	входу у сегмент
Наукові інститути, підприємства, що займаються розробкою систем адаптивного управління об'єктом	помірна	специфічний	середня	немає бар'єру входу у галузь

Проаналізувавши потенційні групи споживачів обираємо цільові групи та визначаємо стратегію охоплення ринку. Оскільки компанія працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу, то використовуємо стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку, а саме стратегію диференціації (табл. 4.15).

Стратегія диференціації передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару (у ширшому розумінні – комплексі маркетингу), бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Альтернатива	Стратегія	Ключові	Базова
--------------	-----------	---------	--------

розвитку проекту	охоплення ринку	конкурентоспроможні позиції	стратегія розвитку
Стратегія диференціації	Ринкове позиціонування	<ul style="list-style-type: none"> • по відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність; • прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів; • підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника; 	

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування (табл. 4.16), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 4.16 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової	Базова стратегія	Конкурентоспроможні позиції власного	Комплекс асоціацій
----------------------------------	-------------------------	---	---------------------------

аудиторії	розвитку	проекту	
Система повинна забезпечити швидкий й оптимальний вибір методів реалізації	Стратегія диференціації	- Відсутність конкурентів - Активний розвиток галузі	Адаптивність Оптимальність за витратою палива

Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, яку отримає споживач. Для цього у табл. 4.17 проаналізуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару. В ідею даного стартап-проекту покладені наукові дослідження. Останньою складовою маркетингової програми є розробка концепції маркетингових комунікацій, що спираються на попередньо обрану основу для позиціонування, що визначає специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.18).

Таблиця 4.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
----------------	-----------------------------------	--

Швидкий, надійний і зручний підхід до вибору структури системи адаптивного управління	Автоматизація та оптимальність процесу	Інноваційний підхід
	Ефективність роботи	Можливість об'єднувати апаратні і програмні засоби з кращими характеристиками

Таблиця 4.18 – Визначення специфіки поведінки клієнтів

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
Обережний вибір потенційних контрагентів, що зумовлено особливістю ринку	Інтернет-розсилки	Технологія	Привернути увагу до проекту
	Спеціалізовані видання	Технологія	
	Спеціалізовані виставки, форуми	Технологія	

Висновки до розділу

Оскільки ринок олігополістичний, то бар'єри входу на ринок – високі. Інтенсивна конкуренція в даному сегменті ринку відсутня. Для ринкової реалізації проекту обрано стратегію диференційованого маркетингу, яка передбачає чітку ідентифікацію окремих сегментів, з якими планує

взаємодіяти стартап, зокрема наукові інститути, дослідницькі центри та підприємства, які займаються розробкою та дослідженням систем адаптивного управління об'єктами. Доцільною є подальша імплементація проекту.

Альтернативою впровадження проекту на ринок обрано проведення краудфандингової компанії зі збору коштів яка є імовірнішою і простішою, а строки реалізації є більш стислими.

Висновки

Аналіз оптимальних за витратою палива процесів у нестационарних системах n - го порядку дозволив встановити їх послідовну оптимальність, що дозволило при синтезі оптимальних керувань використовувати принцип прогнозування. Для цілей параметричної ідентифікації нестационарних об'єктів при оптимізації їх за витратою палива використані самоналаштовуючі контури, що синтезовані на основі методу допоміжного оператора. Основною перевагою запропонованого алгоритму

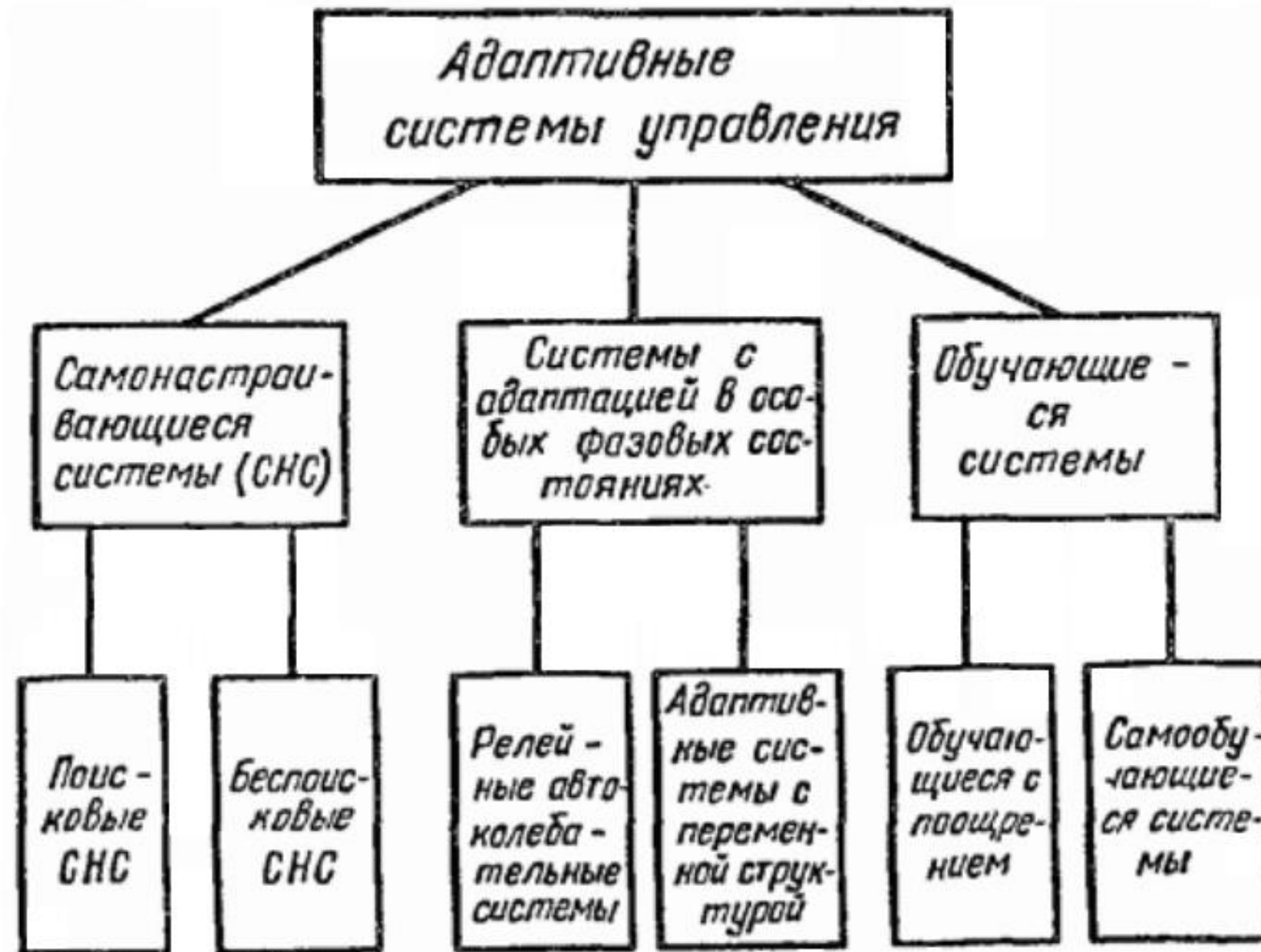
налаштування є відсутність пошукових коливань та швидке сходження процесу налаштування.

Список використаної літератури

1. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы
2. Иванов В.А., Фалдин Н.В. Теория оптимальных систем автоматического управления
3. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н., Земляков С.Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления
4. Игнатенко В.Н., Шпит С.В., Синеглазов В.М., Толокняненко В.А. Адаптивная оптимизация в системах n -го порядка с переменными параметрами

5. Зеленський К.Х., Ігнатенко В.М., Волченко М.І. Прогнозоване оптимальне за витратою палива управління нестационарними системами
6. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами
7. Ігнатенко В.Н., Синеглазов В.М. Синтез алгоритма оптимального по расходу топлива управления нестационарными системами второго порядка

Класифікація адаптивних систем



Демонстраційний плакат №1
до магістерської дисертації на тему
„Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління
нестационарним об'єктом”

Розробив: Волченко М.І.
Прийняв: Ігнатенко В.М.

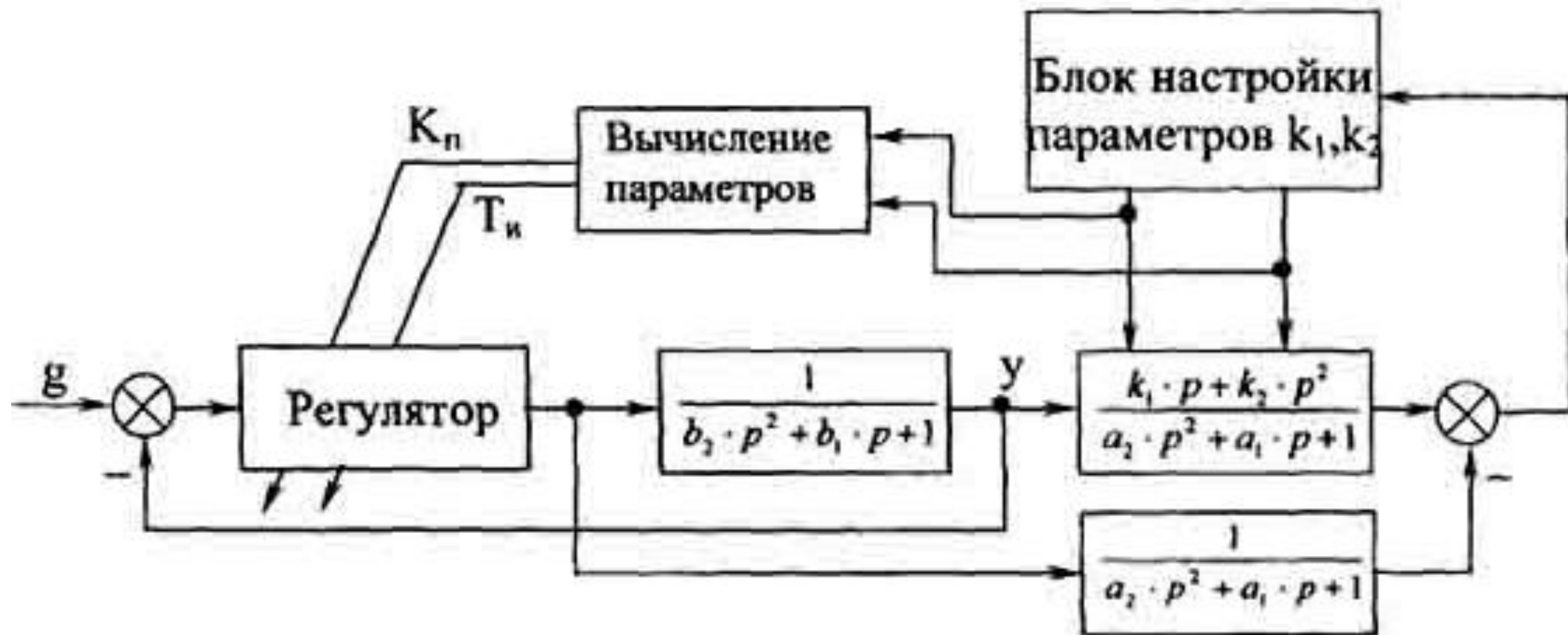
Адаптивна система з паралельною налаштованою моделлю



Демонстраційний плакат №2
до магістерської дисертації на тему
„Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління
нестационарним об'єктом”

Розробив: Волченко М.І.
Прийняв: Ігнатенко В.М.

Адаптивна система з послідовною налаштованою моделлю

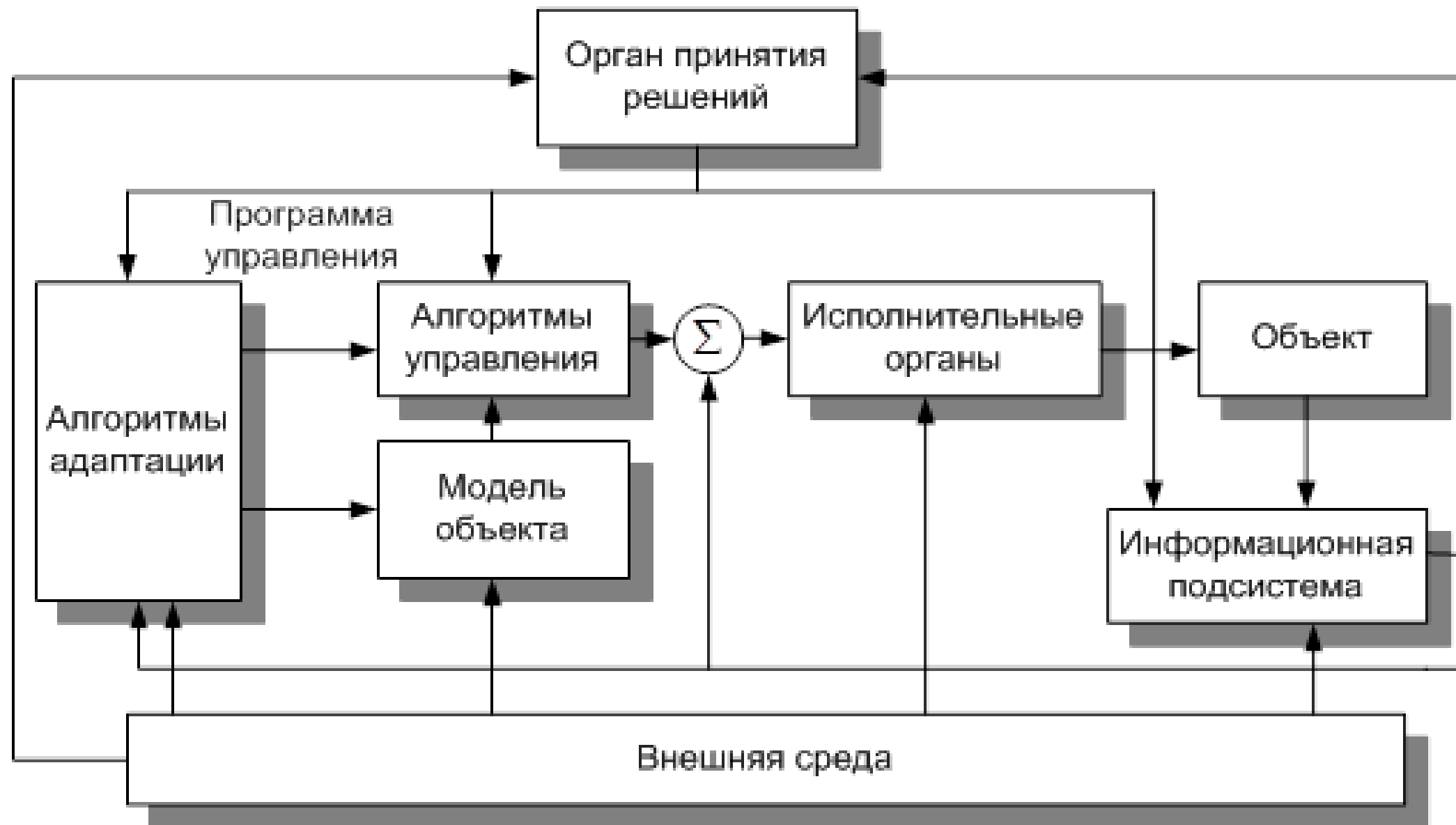


Демонстраційний плакат №3
до магістерської дисертації на тему
„Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління
нестационарним об'єктом”

Розробив: Волченко М.І.

Прийняв: Ігнатенко В.М.

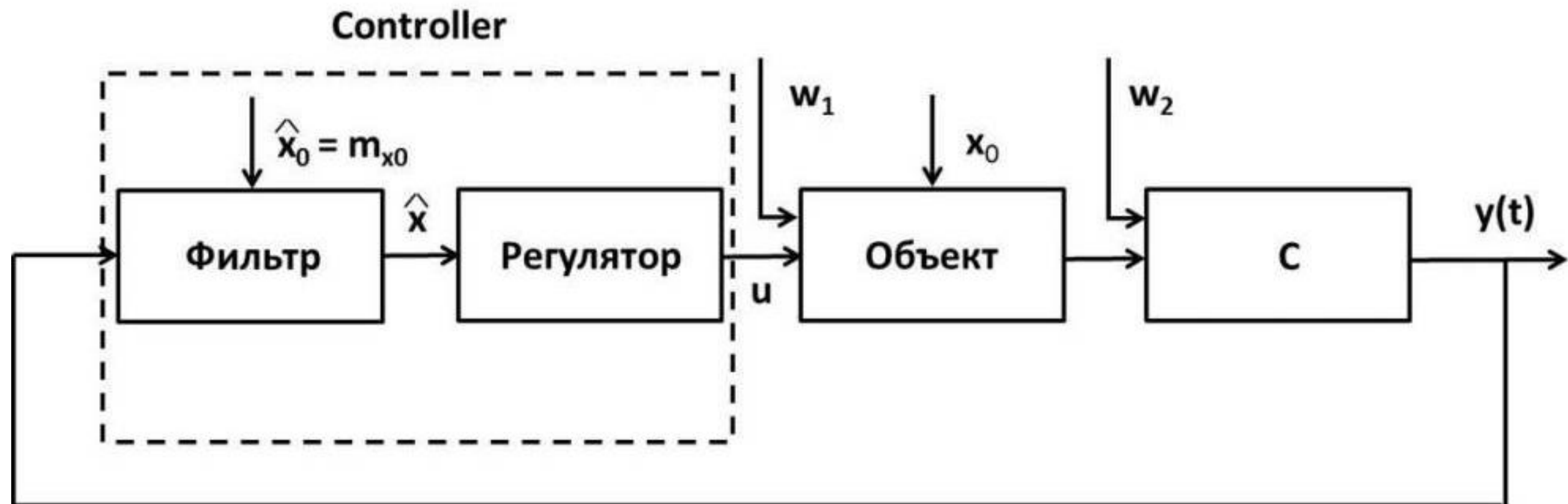
Структурна схема адаптивної системи управління



Демонстраційний плакат №4
до магістерської дисертації на тему
„Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління
нестационарним об'єктом”

Розробив: Волченко М.І.
Прийняв: Ігнатенко В.М.

Система управління динамічними об'єктами



Демонстраційний плакат №5
до магістерської дисертації на тему
„Адаптивна оптимальна за витратою палива система управління
нестационарним об'єктом”

Розробив: Волченко М.І.
Прийняв: Ігнатенко В.М.